

UNIVERSITÉ DE DIJON
Année scolaire 1943-44

FACULTÉ DES SCIENCES

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN PAYS DÉSERTIQUE

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR (Diplômé d'Etat)

PAR

ALY AL-HARRAS

INGÉNIEUR I. T. N.

Soutenue le 18 Décembre 1943 devant la Commission d'examen

JURY	{	MM. A. BOUTARIC,	{	<i>Président</i>
		G. SIMON,		<i>Examineurs</i>
		DÉCOMBE,		

LYON

IMPRIMERIE LOUIS MOULIN ET FILS

1949

CONTRIBUTION A L'ÉTUDE DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE EN PAYS DÉSERTIQUE

Seul le présent exemplaire a reçu l'approbation
de la Faculté des Sciences

Le Professeur de Physique générale :

Signé : BOUTARIC.

FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

ADMINISTRATION

Doyen	MM. SIMON.
Assesseur	LAGRANGE.
Secrétaire des Facultés	VIAN.

Doyens honoraires

MM. BATAILLON, RECOURA.

Professeurs honoraires

MM. METZNER, TOPSENT, VOISENET.

Professeurs titulaires

Calcul différentiel et Mathématiques générales ..	MM. LAGRANGE.
Mécanique rationnelle et appliquée	GEVREY.
Physique générale et Chimie physique	BOUTARIC.
Physique industrielle et Physique S.P.C.N.	SIMON.
Chimie générale	LOMBARD.
Chimie appliquée et Chimie S.P.C.N.	DECOMBE.
Zoologie et Physiologie animale	DENIS.
Botanique et Biologie végétale S.P.C.N.	BUGNON.
Géologie, Géographie physique et Minéralogie	CIRY.

Chargés de cours complémentaires

Mathématiques générales	MM. DURRANDE.
Physique générale	AMIOT.
Physique industrielle	BOUCHARD.
Chimie S.P.C.N.	TUOT.

Chefs de travaux

Maître de Conférences adjoint, Chimie	MM. BELLET.
Physique générale	DOLADILHE.

Assistants

Physique	MM. AMIOT.
Physique industrielle et Physique S.P.C.N.	BOUCHARD.
Chimie générale	M ^{me} GUYARD.
Chimie appliquée	M ^{lle} MATHEY.
Zoologie	CHAUDONNET.
Botanique	ARNAL.
Géologie	N...

La Faculté n'entend donner aucune approbation, ni improbation aux opinions émises dans ces thèses ; ces opinions doivent être considérées comme propres à leurs auteurs.

UNIVERSITÉ DE DIJON

Année scolaire 1943-44

FACULTÉ DES SCIENCES

**CONTRIBUTION A L'ÉTUDE
DE L'UTILISATION DE L'ÉNERGIE SOLAIRE
EN PAYS DÉSERTIQUE**

THÈSE

PRÉSENTÉE

A LA FACULTÉ DES SCIENCES DE L'UNIVERSITÉ DE DIJON

POUR OBTENIR

LE GRADE D'INGÉNIEUR-DOCTEUR (Diplômé d'Etat)

PAR

ALY AL-HARRAS

INGÉNIEUR I. T. N.

Soutenue le 18 Décembre 1943 devant la Commission d'examen

JURY {	MM. A. BOUTARIC,	<i>Président</i>
	G. SIMON,	{ <i>Examineurs</i>
	DECOMBE,	

LYON

IMPRIMERIE LOUIS MOULIN ET FILS

1949

UNIVERSITE DE LYON

UNIVERSITE DE LYON

CONTRIBUTION A L'ETUDE
DE L'UTILISATION DE L'ENERGIE SOLAIRE
EN PAYS DESERTIQUE

THÈSE



LE GRADE D'INGENIEUR (Diplôme d'Etat)

ALY AL-HARRAS

Soutenue le 18 Décembre 1963 devant la Commission d'examen

M. A. BOUTARIC, Président
G. SIMON, Rapporteur
DECOMBE, Examinateur

LYON

IMPRIMERIE LOUIS MOULIN ET FILS

A LA MEMOIRE DE MES PERE ET MERE,

Qui furent mes dieux et restenī la
pensée la plus divine en moi.

A MES FRERES

S, Ex. ABDEL AZIM BEY

Juge chef du tribunal Magles Hassbi

LE DOCTEUR ABDEL HAMID

Médecin

HASSAN

Ingénieur agronome

En gage de notre affection.

A MES AMIS

A MONSIEUR RAYMOND LE PONTOIS

Licencié en droit

A MADAME GEORGETTE HARDUIN

Gesellschaft gefunden.

Mit euch habe ic die schönste

A MES MAITRES

Monsieur le Professeur Augustin BOUTARIC

*Professeur de Physique générale à la Faculté des Sciences de Dijon
Membre de l'Académie d'Agriculture de France
et du Comité Météorologique International*

A Monsieur Georges SIMON

Doyen de la Faculté des Sciences de Dijon

A MONSIEUR DECOMBE

Professeur à la Faculté des Sciences de Dijon

To Dr C. ABBOT

Of the Smithsonian institution U. S. A.

Admiration from one pupil of yours.

A MES AMIS

DE LA FACULTE DES SCIENCES DE DIJON

M. AMIOT

Assistant de physique

M. DOLADHILE

Chef de Travaux de physique

Mlle Simone FABRY

Mlle Paulette BERTHIER

Laboratoire de physique

A S. E. DIWANY BEY

Directeur de la mission universitaire égyptienne à Paris

En respectueux hommage.

INTRODUCTION

Nous nous sommes proposé, dans ce travail, d'envisager l'utilisation de la grande source d'énergie qu'est le soleil et plus particulièrement la transformation de l'énergie solaire en énergie mécanique susceptible de permettre l'irrigation du désert africain dans les régions peu éloignées du Nil.

Nous aurions voulu effectuer des expériences préalables, soit en France, soit en Egypte, pour nous rendre compte si cette utilisation de la chaleur solaire était possible. Malheureusement, les circonstances nous ont empêché de réaliser ces projets. C'est pourquoi nous avons dû nous borner dans ce travail à donner une vue d'ensemble sur les méthodes et appareils de mesure utilisés pour évaluer l'intensité solaire et sur les essais faits jusqu'à ce jour pour transformer l'énergie solaire en énergie mécanique. Nous terminons par un projet d'irrigation de 10 hectares de la steppe, possible, sans doute, grâce aux données des divers expérimentateurs que nous avons cités au cours de ce travail.

Nous tenons ici à exprimer notre reconnaissance à Monsieur le Professeur A. BOUTARIC qui a facilité notre travail grâce aux conseils éclairés qu'il n'a cessé de nous prodiguer et aux nombreux documents qu'il a mis si aimablement à notre disposition.

CHAPITRE PREMIER

LE SOLEIL

Le soleil est un corps à haute température et faible densité, constitué, selon C. ABBOT, par des gaz incandescents. Toutefois, au centre de l'astre, ces gaz auraient une densité comparable à celle des liquides, en raison des fortes pressions auxquelles ils se trouvent soumis. La température du soleil est supérieure à toute température terrestre.

Du point de vue de son rayonnement, le soleil se comporte comme un corps noir d'une température de 6000° ; cette température représente celle que devrait avoir un corps noir pour rayonner superficiellement comme le soleil, mais elle n'indique nullement la température interne de l'astre qui doit être formidablement élevée, de l'ordre du million de degrés (certaines considérations théoriques conduisent à admettre que la température centrale serait de 400 millions de degrés).

On pouvait se demander pourquoi le soleil n'est pas éteint depuis longtemps, un calcul simple permet, en effet, de mettre en évidence l'importance de la perte d'énergie qu'il subit annuellement. Etant donné que la consatnte solaire est d'environ 2 calories grammes par minute et par centimètre carré (1,932 exactement, d'après ABBOT) l'énergie totale rayonnée par an vers la surface du globe est 4×10^{33} calories. Comme la masse du soleil est 2×10^{33} g. on voit que la perte d'énergie par gramme de diamètre et par an est égale à 2 cal. g. Il est difficile de concevoir que cette perte énorme de chaleur n'entraîne pas une diminution appréciable de rayonnement solaire.

L'hypothèse la plus simple que l'on puisse faire sur l'origine du rayonnement solaire serait d'assimiler le soleil à un corps chaud se refroidissant lentement et dépensant la chaleur emmagasinée lors de sa formation. Dans ces conditions, le soleil, après une durée relativement courte, serait devenu une masse complètement froide. En admettant que la chaleur spécifique moyenne du soleil est égale à 1, l'abaissement de température atteindrait en effet 400° environ en 200 ans ; et, un tel refroidissement entraînerait un abaissement de la température terrestre d'environ 20° ; ce qui aurait pour effet de transformer la surface du globe en un désert glacé.

On pourrait encore supposer que le soleil brûle comme un immense foyer de charbon, mais une combustion même énergique et rapide, comme celle de l'hydrogène et des explosifs ne permettrait d'atteindre qu'une température de l'ordre de 3000° , alors que celle du soleil est considérablement plus élevée ; en outre, la combustion du charbon au contact de l'oxygène ne pourrait entretenir la chaleur solaire que pendant quelques milliers d'années : 12.000 environ.

D'après l'hypothèse météorique proposée par MAYER et THOMSON, la température solaire serait entretenue par la chute de particules météoriques rencontrant le soleil avec une grande vitesse et lui fournissant, au moment du choc, la totalité de leur énergie cinétique ; pour une vitesse de 600 km/sec., la chaleur dégagée atteindrait : 48×10^6 calories par gramme de matière capturée. Mais cette hypothèse conduirait à admettre un accroissement de la masse solaire, et par suite une accélération de la vitesse de rotation du soleil, ce qui réduirait l'année de 2,6 secondes, alors que les mesures précises évaluent la variation de la durée de l'année à 0,5 seconde au maximum par siècle.

Une hypothèse analogue consiste à admettre, comme l'ont fait HELMOLTZ, LORD KELVIN et ABBOT, que l'énergie solaire est entretenue par la chute vers son centre de particules périphériques sous la seule action des forces de gravitation très intenses du soleil. Cette condensation progressive permettrait d'expliquer le rayonnement solaire pendant 3×10^7 années, mais ce laps de temps est bien inférieur à celui qu'il faut assigner à la durée des époques géologiques.

Une théorie proposée récemment par J. PERRIN semble fournir une interprétation acceptable ; elle admet, comme conséquence de la théorie de la relativité, que la matière constitue une forme d'énergie. Toute diminution de la masse d'un système entraîne une émission d'énergie considérable. D'après EINSTEIN, une perte de masse de m grammes correspond à une émission d'énergie :

$$U = mV^2$$

V désignant la vitesse de la lumière dans le vide, soit :

$$U = m \times 9 \times 10^{20} \quad \text{ergs.}$$

D'autre part, les recherches sur les substances radioactives ont remis en honneur la conception de Prout d'après laquelle les corps simples seraient formés par la condensation d'atomes d'hydrogène en nombre plus ou moins grand. Les déterminations précises de Stas et de ses continuateurs ayant établi que les masses atomiques n'étaient pas des multiples simples exacts de la masse atomique de l'hydrogène, cette conception avait été abandonnée. Cependant les observations de spectroscopie sidérale semblent fournir une confirmation des vues de Prout et montrent que la matière apparaît sous un stade de condensation atomique d'autant plus avancé que l'astre qu'elle constitue est d'origine plus ancienne. Dans les nébuleuses qui représentent des mondes en formation, on ne trouve guère que l'hydrogène et l'hélium, dans les étoiles jeunes apparaissent des corps simples de masse atomique plus grande, les atomes lourds ne se rencontrent que dans les astres dont l'évolution est plus avancée. L'astronome Lockyer bien avant la découverte de la radio-activité, proclamait déjà l'unité de la matière dans l'univers.

L'attribution d'une masse à l'énergie donne un sens exact aux écarts que les mesures ont relevés entre les masses atomiques des corps simples et les prévisions tirées de l'hypothèse de Prout. Dans le système où l'on pose égale à 16 la masse atomique de l'oxygène, on sait que les déterminations les plus précises donnent 1,0077 pour celle de l'hydrogène, 4 pour celle de l'hélium, 12 pour celle du carbone. Si l'on admet que ces corps sont formés respectivement par la condensation de 4, 12, 16 atomes d'hydrogène, on voit que cette condensation est accompagnée d'une perte de masse égale à 0,0077 par gramme de matière, autrement dit un gramme de

matière (hydrogène) a, en se transformant en hélium, en carbone et oxygène, éprouvé une perte de masse de 7,7 mg. D'après la théorie d'Einstein, cette perte de masse s'accompagne d'une libération d'énergie égale à :

$$0,0077 \times 9 \times 10^{20} \text{ ergs,}$$

soit :

$$166 \times 10^{11} \text{ calories}$$

En admettant que la nébuleuse solaire ait été initialement constituée par des atomes d'hydrogène, on voit que l'énergie libérée par la condensation de ces atomes pourrait bien être la source du rayonnement solaire.

La condensation de l'hydrogène à l'état d'hélium dégagerait, en effet, 166 milliards de calories par grammes, c'est-à-dire de quoi alimenter pendant plus de 80 milliards d'années, le rayonnement solaire avec son intensité actuelle.

La formation des atomes lourds, qui s'accompagne d'une perte de masse plus grande, fournirait une quantité de chaleur beaucoup plus considérable. On s'expliquerait ainsi les quelques milliards d'années de rayonnement sensiblement stationnaire dont l'histoire de la terre apporte la preuve.

La théorie proposée par Jeans et par Eddington, qui tend à prévaloir à l'heure actuelle, va plus loin. D'une manière générale, l'énergie émise par les astres proviendrait de la désintégration des atomes dont les constituants, électrons et protons, disparaissent définitivement en se transformant en énergie suivant l'équivalence fixée par la théorie d'Einstein. Chaque gramme de matière solaire fournit 9×10^{20} ergs, soit 2×10^{13} cal., et l'énorme quantité d'énergie ainsi libérée suffirait à entretenir le rayonnement solaire.

CHAPITRE II

MESURE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Intensité du rayonnement solaire. — L'intensité du rayonnement solaire à un instant donné en un point du globe, est mesurée par la quantité de chaleur absorbée en une minute par une surface noire d'un cm^2 disposée normalement aux rayons.

On peut, pour obtenir la valeur de cette intensité, procéder de deux manières différentes : soit mesurer la vitesse d'échauffement d'un corps de capacité calorifique connue exposé au rayonnement, cette mesure se fait par un pyrhéliomètre ; soit mesurer l'excès final de la température du corps sur celle du milieu ambiant, détermination faite à l'aide d'un actinomètre.

Nous allons passer en revue les principaux appareils qui ont été utilisés par ordre chronologique :

1° Mesures de l'intensité du rayonnement solaire à un instant déterminé

Pouillet fut le premier à effectuer des mesures quelque peu précises. Son pyrhéliomètre se compose d'une boîte cylindrique plate remplie d'eau, dans laquelle plonge le réservoir d'un thermomètre. Le fond de la boîte est recouvert sur sa face externe, de noir de fumée, et disposé normalement aux rayons solaires, les autres parties de la boîte sont argentées et polies, fig. 1.

Soit t° l'élévation de température observée après une durée d'exposition de 5 minutes, t°_1 et t°_2 les refroidissements

subis pendant la même période avant et après l'essai par l'appareil qu'un écran protège contre le rayonnement solaire. Pouillet admet que l'élévation de température due à l'action du soleil en tenant compte des pertes par conduction et convection a pour expression approchée :

$$\Theta = t + \frac{t_1 + t_2}{2}$$

Il en résulte que la chaleur apportée par minute et par cm^2 de la surface exposée S est, en désignant par M la capacité calorifique de l'appareil :

$$Q = \frac{M\Theta}{5S}$$

Pyrhéliomètre de Crova, d'Abbot et Fowle.

Divers perfectionnements ont été apportés à l'appareil de Pouillet, notamment par Crova qui remplaça l'eau par du mercure à l'intérieur de la boîte cylindrique, par Abbot et Fowle qui adoptèrent le dispositif que voici :

Le rayonnement solaire pénètre à travers un tube (fig. 2) noirci et coupé de diaphragmes dont les ouvertures vont légèrement en diminuant jusqu'à une ouverture de surface connue. L'enceinte e en bois est garnie intérieurement de cuivre. Le rayonnement solaire tombe sur un disque b en cuivre, noirci sur sa face antérieure et portant un conduit diamétral rempli de mercure dans lequel plonge le réservoir d'un thermomètre au $1/100^\circ$; un volet l sert à régler la durée de l'exposition ; le centrage de l'appareil est obtenu aisément grâce au trou t et au repère r . Enfin l'enceinte e est protégée par une garniture de zinc.

Avec cet appareil la durée d'insolation nécessaire à une mesure n'excède pas 2 minutes. Il en est de même des durées relatives du refroidissement de l'instrument lorsque le volet intercepte les rayons solaires, dans ces conditions l'ensemble des lectures relatives à une mesure dure seulement 6 minutes.

Actinomètre de de Saussure.

De Saussure, après Pouillet, voulant comparer l'intensité du rayonnement solaire aux sommets des montagnes et dans

les vallées, eut l'idée, pour protéger le thermomètre utilisé contre l'action refroidissante de l'extérieur, de l'enfermer dans une boîte de liège enduite de noir de fumée et recouverte par une lame de verre blanc. Il reconnut ainsi que l'excès de température indiqué par ce thermomètre placé au soleil sur la température qu'il indique à l'ombre est plus grande aux sommets des montagnes que dans les vallées. Le dispositif utilisé par de Saussure a reçu le nom d'actinomètre ; il a été perfectionné par différents auteurs.

Actinomètre de Violle.

Cet appareil comprend essentiellement un thermomètre T qui pénètre par un orifice O au centre d'une enveloppe métallique en laiton de 15 cm. de diamètre, protégée par une deuxième enveloppe sphérique de 23 cm. On assure une température constante à la première enveloppe, soit en y faisant circuler un courant d'eau ou de vapeur, soit en remplissant de glace l'intervalle des deux enveloppes (fig. 3).

Les rayons solaires pénètrent par une ouverture D placée à l'extrémité du tube de 17,5 mm. de diamètre dirigé suivant l'un des diamètres de la sphère en débouchant dans l'enveloppe interne. L'appareil peut être facilement orienté de manière que les rayons tombent bien sur la boule du thermomètre.

Pour effectuer une mesure, on commence par s'assurer que le trou d'admission étant fermé, la température demeure invariable, puis on ouvre cet orifice et on maintient l'appareil orienté jusqu'à ce que le thermomètre ait atteint un maximum stationnaire, ce qui exige environ un quart d'heure. On ferme ensuite l'orifice d'admission et on observe la marche du refroidissement pendant 5 minutes.

L'état stationnaire est atteint quand la quantité de chaleur reçue par le thermomètre pendant un temps donné, est égale à la quantité de chaleur perdue pendant la même période ; cette dernière est facile à calculer d'après la dernière phase de l'expérience, à condition de connaître la capacité calorifique de la partie du thermomètre exposée au rayonnement. Il suffit de déterminer la section de la boule du thermomètre pour obtenir, en valeur absolue, la quantité de chaleur reçue en une minute par cm^2 de surface exposée normalement aux rayons solaires.

Actinomètre à alcool de Crova (fig. 4).

Le réservoir r d'un thermomètre à alcool absolu RTr dont la surface a été cuivrée puis recouverte électrolytiquement de noir de platine, est placé au centre d'une enceinte sphérique B en laiton nickelée extérieurement et noircie intérieurement, composée de deux hémisphères pouvant se séparer ou se réunir par une fermeture à baïonnette. Le diamètre du réservoir thermométrique est de 18 mm., celui de l'enceinte est de 55 mm. et la longueur totale de l'appareil est de 50 centimètres.

Les radiations solaires pénétreront par un orifice circulaire de 10 mm. de diamètre percé dans un double écran en laiton nickelé E. La totalité des radiations qui pénètrent dans l'enceinte est reçue sur le réservoir thermométrique. Un double écran se place sur l'ouverture de l'actinomètre lorsqu'on veut le mettre à l'abri des rayons solaires. Deux thermomètres frondes complètent l'appareil. le réservoir de l'un d'eux est nu et l'autre est entouré de baptiste mouillée d'eau distillée. Au moment de l'observation, ils permettent de déterminer la température et l'état hygrométrique de l'air. En outre, grâce à un dispositif spécial, on peut éviter toute agitation de l'air pendant les mesures à effectuer, celles-ci peuvent être faites à peu près par n'importe quel temps. Le thermomètre, très sensible, utilisé par Crova, est un thermomètre métastatique à alcool absolu.

On fait une première observation à l'ombre pendant une minute, puis une deuxième au soleil d'une durée de 2 minutes, enfin une troisième à l'ombre d'une minute.

La température corrigée Θ est donnée approximativement par :

$$\Theta = \frac{t_1 + t_2}{2} + t$$

En multipliant par le coefficient d'étalonnage de l'appareil, on obtient l'intensité calorifique. Graphiquement l'observation complète est sensiblement représentée par trois droites dont les coefficients angulaires sont les vitesses de refroidissement et d'échauffement. Ces droites correspondent à des excès thermométriques qui ne dépassent pas $1/2^\circ$ dans les circonstances habituelles. Les meilleures conditions de mesure sont : un léger échauffement à l'ombre avant l'in-

solation et un léger refroidissement à l'ombre après insolation.

L'absorption exercée par le noir de fumée qui recouvre la boule du thermomètre dépend de la structure du noir de fumée, c'est-à-dire de la flamme qui l'a déposé, et de la région de la flamme dans laquelle s'est fait le dépôt. Crova obtient une couche toujours comparable à elle-même ayant un coefficient d'absorption égal à 0,98 en écrasant la flamme d'une bougie dans son tiers supérieur, là où les produits pyrogénés sont à peu près absents, au moyen de la boule du thermomètre qu'on y promène dans tous les sens, et en lavant la couche obtenue à l'alcool absolu plusieurs fois. Cette dernière opération a pour effet d'éliminer les produits qui peuvent subsister et surtout de transformer la couche de structure poreuse et lâche en une couche cohérente homogène et conductrice.

Crova montre qu'il s'établit une compensation presque rigoureuse entre l'augmentation de coefficient de dilatation de l'alcool avec la température et la variation de la chaleur spécifique qui conditionne la valeur en eau de l'alcool restant dans la boule à t° , cette compensation rend inutile toute correction dans les conditions habituelles de température, mais si l'on opère par des températures exceptionnellement basses ou élevées, il est nécessaire, pour atteindre une approximation de $1/100^{\circ}$, d'introduire une correction.

Pyrhéliomètre Knut Angström. Principe.

Dans cet appareil, on met à profit le courant électrique qui se développe entre deux pinces thermo-électriques en contact avec deux lames de manganine noircies A et B disposées côte à côte. L'une d'elles, A, est exposée normalement aux rayons solaires, l'autre B étant préservée par un écran (fig. 5).

On envoie à travers la lame B un courant électrique d'intensité suffisante pour que la température de cette lame devienne égale à celle de la lame A. Lorsque cette condition est réalisée, le galvanomètre inséré dans le circuit du couple ne dévie plus et l'on admet que l'énergie qui traverse le circuit de chauffage est égale à celle qui a chauffé la lame exposée au soleil. La première est facilement calculable par la formule :

$$W = I^2. R. t$$

L'intensité I du courant de chauffage peut être mesurée avec une précision suffisante à l'aide d'un milliampermètre. En général, on fait trois mesures : B étant d'abord à l'abri, puis A, ensuite à nouveau B, les courants de compensation étant successivement i_1 , i'_1 , i_2 , l'intensité du rayonnement solaire à l'époque T où la lame B étant ombragée à pour expression :

$$W = c/4 \left(- \frac{i_1 + i_2}{2} + i'_1 \right)^2$$

c : Capacité calorifique de l'appareil. — Le pyrhéliomètre Angström, d'un usage très étendu, a fait l'objet de diverses critiques : Certaine dissymétrie provenant en particulier de ce que la lame exposée est chauffée directement à sa surface alors que l'autre est chauffée dans sa masse par le courant électrique, d'autre part les pertes par convection et rayonnement ne sont pas identiques pour les deux lames ; d'après Abbot les indications de l'instrument sont trop faibles et doivent être multipliées par 1,092.

Quant aux erreurs dues aux dissymétries présentées par les soudures qui, en général, ne sont pas rigoureusement identiques, elles peuvent être éliminées en ayant soin, comme il a été indiqué plus haut, de prendre la moyenne des observations faites en exposant et ombrageant alternativement les deux lames.

Différences entre l'appareil d'Abbot et de K. Angström.

Le pyrhéliomètre d'Abbot fournit la valeur moyenne de l'intensité du rayonnement solaire pendant la durée de 100 secondes, un peu plus longue que celle à laquelle correspond la mesure faite à l'aide du pyrhéliomètre d'Angström. On conçoit que pour une faible période les écarts puissent être assez notables surtout que les angles sous lesquels les rayons solaires tombent sur les deux appareils ne sont pas exactement les mêmes. Toutefois pour une période suffisamment longue, les deux pyrhéliomètres donnent des résultats identiques.

Les résultats indiqués dans l'échelle Upsale (Angström) sont de 3,3 % plus faibles que ceux indiqués dans l'échelle Smithsonian (Abbot).

Actinomètre bi-métallique Michelson.

Cet appareil se compose d'une lame mince bi-métallique qui s'incurve par suite de la dilatation inégale des deux métaux constituants, sous l'effet de la radiation solaire. Cette courbure mesurée à l'aide d'un microscope, dépend de la quantité de chaleur reçue par la lame.

L'analyse du phénomène fondée sur la théorie de l'élasticité a conduit M. Michelson à la conclusion que pour une épaisseur donnée de la lame, l'actinomètre présente le maximum de sensibilité quand les carrés des épaisseurs des deux métaux sont inversement proportionnels aux modules d'élasticité correspondants. Il en résulte qu'en employant une lame bi-métallique platine-cuivre le rapport des épaisseurs doit être égal à $11/12$ et à $2/3$ pour une lame platine-argent.

Dans certains modèles, l'une des parties de la bi-lame est en invar, l'autre en fer. Les dimensions d'une telle bi-lame dans l'un de ces actinomètres étaient par exemple : longueur 11 mm., épaisseur 0,05 mm., largeur 2 mm.

L'actinomètre à lame bi-métallique étant un instrument qui ne fournit que des mesures relatives, il est essentiel pour obtenir des résultats comparables, de l'étalonner à l'aide d'un pyrhéliomètre absolu.

Le coefficient d'étalonnage ainsi obtenu est rigoureusement valable dans le cas où l'on opère dans les mêmes conditions que celles pour lesquelles l'appareil a été étalonné.

Le microscope doit être placé dans une position fixe bien déterminée. L'actinomètre doit être manipulé avec précaution, et rester constamment à l'abri du vent ; on doit le disposer sur un support suffisamment rigide. S'il vient à être emporté en un lieu où la température diffère notablement de celle du lieu primitif d'observation, il ne peut être utilisé qu'après un certain délai et un nouveau réglage. En réalité chaque essai comporte trois mesures : la première et la dernière étant faites à l'ombre et la mesure intermédiaire au soleil. On adopte comme mesure définitive la différence entre la lecture au soleil et la moyenne de deux lectures faites à l'ombre.

Pyrhéliomètre d'Abbot à disque d'argent.

Cet appareil ne diffère pas sensiblement du pyrhéliomètre d'Abbot et Fowle à disque de cuivre déjà décrit. L'expérience consiste à déterminer l'élévation de température qui correspond à l'admission du faisceau solaire pendant un certain temps, quelques minutes par exemple. L'étalonnage est fait par comparaison avec un appareil absolu.

Pyrhéliomètre absolu d'Abbot.

Dans le but d'obtenir des mesures pyrhéliométriques comparables, la Commission des Radiations, de l'Organisation Météorologique Internationale et l'Union Géographique Internationale ont préconisé l'emploi d'un pyrhéliomètre étalon à courant d'eau appliquant à la fois la méthode de compensation électrique de K. Angström et la méthode d'absorption intégrale utilisée à la Smithsonian Institution.

La cavité absorbante est disposée dans un calorimètre à eau. Le rayonnement solaire, sous forme d'un faisceau de section droite bien déterminée, tombe sur un cône absorbant noirci, après avoir traversé un cylindre orienté parallèlement à l'axe du faisceau. Dans le modèle adopté par Abbot et Fowle, le courant d'eau circule dans un canal hélicoïdal autour de la paroi du cône. L'élévation de température de l'eau est mesurée par un thermomètre à résistance de platine dont les bobines se trouvent à l'entrée et à la sortie de l'eau. L'ensemble est isolé par une enveloppe à double paroi dans laquelle on a fait le vide. Un dispositif électrique permet d'apporter au système des quantités de chaleur connues lorsqu'on veut étalonner l'appareil.

Pyrhéliomètre Voloshine.

Le tube qui reçoit la radiation solaire est plongé dans un calorimètre à glace dans lequel la variation de volume résultant de la fusion de la glace est mesurée par le déplacement d'un index de mercure.

Héliothermomètre d'Anders Angström.

Cet appareil, de construction très simple, est constitué par un thermomètre dont le réservoir, en forme de spirale, est disposé normalement à l'axe d'un tube cylindrique qu'on oriente parallèlement aux rayons solaires. Pour opérer à

partir d'une température bien définie, l'orifice du tube étant obturé par un écran, on fait passer dans le tube (qui est percé d'un trou convenable) un courant d'air à l'aide d'un petit ventilateur. Après avoir arrêté le courant d'air, on lit l'indication du thermomètre, on enlève l'écran pendant un temps déterminé (90 sec.) et l'on fait une deuxième lecture. La comparaison avec un actinomètre de Michelson a montré que l'élévation de température est sensiblement proportionnelle à l'intensité de la radiation solaire.

Appareil à distillation (Lucimètre).

Un liquide volatil contenu dans un réservoir en verre s'évapore sous l'action du rayonnement solaire et vient se condenser dans un tube gradué. La quantité moyenne d'eau distillée pendant un intervalle de temps déterminé peut servir à évaluer l'intensité moyenne du rayonnement solaire pendant l'intervalle de temps envisagé.

Il existe divers appareils de ce type, notamment ceux d'Angström, Bellain, Bellain-Henry, et Wilson. Leur simplicité en a répandu l'emploi, malheureusement ils ne fournissent que des indications assez grossières. L. Besson, qui les utilise à l'observatoire de Montsouris, et dans diverses autres stations de la région parisienne, les considère comme susceptibles de mesurer l'intensité lumineuse, d'où le nom de lucimètre par lequel on les désigne habituellement.

Appareil à cellule photo-électrique.

On a aussi utilisé comme récepteurs des cellules photo-électriques, cellules aux métaux alcalins par exemple, exposées dans le vide à l'action du rayonnement solaire. Le courant émis par ces cellules agit sur un galvanomètre sensible dont il est facile d'enregistrer les indications ; mais ces cellules ont une sensibilité très variable avec la longueur d'onde et leurs indications ne sont pas proportionnelles aux intensités énergétiques du rayonnement incident ; la sensibilité peut aussi varier en fonction du temps.

Elles sont donc d'un emploi assez délicat et surtout utilisées pour des études sur l'éclairement.

Pyranomètre de A. Angström.

En 1919, A. Angström a mis au point un pyranomètre qui présente quelques analogies avec le pyréliomètre de L.

Angström. Ce dispositif comporte deux lames métalliques A noircies et une lame métallique B en fer à cheval dont les branches s'insèrent entre les lames précédentes et sont revêtues d'une couche de noir de platine lui-même recouvert d'oxyde de magnésium. Les radiations solaires sont moins absorbées par la surface blanche que par la surface noire. Un galvanomètre inséré entre les lames A et B permet de déceler le courant qui prend naissance par suite de cette inégale absorption ; comme dans le pyrhéliomètre de K. Angström, on élève la température de la lame B à l'aide d'un courant d'intensité connue qu'on fait croître jusqu'à ce que le galvanomètre revienne au zéro (fig. 6).

2° Appareils enregistreurs

Les dispositifs enregistreurs sont montés sur un mouvement équatorial qui les maintient constamment orientés vers le soleil. Il est assez difficile de donner à ce mouvement une marche régulière et, celle-ci d'ailleurs, peut être influencée par les variations de température, il importe donc de s'assurer de la correction de l'orientation.

Ces appareils font connaître l'enregistrement à chaque instant de l'excès de température sur la température ambiante. Si l'intensité du rayonnement était constant, la température atteindrait après un certain temps, une valeur telle que les pertes de chaleur deviendraient égales aux gains de chaleur, mais, l'intensité du rayonnement est variable, de sorte que l'excès de température du récepteur sur la température ambiante varie en fonction du temps. L'enregistrement doit suivre aussi fidèlement que possible les variations de l'intensité de radiation, mais cette condition n'est jamais complètement réalisée par suite des phénomènes d'hystérésis.

Expériences de Crova et de L. Gorczynski.

Crova a fait de nombreux enregistrements au moyen d'un dispositif particulièrement simple, qui consiste essentiellement en une pile thermo-électrique fer-constantan, montée au fond d'un tube qu'un mouvement équatorial maintient dans la direction du soleil. Le faisceau solaire tombe sur l'une

des soudures noircies de la pile, tandis que l'autre soudure est maintenue dans l'obscurité. Un galvanomètre enregistreur trace la courbe représentant les variations du courant corrélatives à l'intensité du rayonnement solaire reçu. Il suffit pour étalonner l'appareil d'effectuer au préalable une mesure absolue.

Le dispositif de Crova a été perfectionné par L. Gorczyński. La pile établie d'après le principe de Moll constitue l'élément principal de l'appareil. On sait que dans cette pile la capacité thermique de la soudure chaude est réduite au minimum, et qu'au contraire la plus grande capacité est donnée à la soudure froide. Ceci se fait par l'adjonction à chaque élément de soudure d'une masse métallique très importante par rapport à celle de l'élément lui-même (constantan-manganine, élément qui a quelques microns d'épaisseur).

Il existe deux types d'appareils Gorczyński, l'un d'eux exige le changement de feuille d'enregistrement toutes les 24 heures, l'inscription se fait par point sur papier carbone. L'enregistrement continu fournit un enregistrement par point sur un ruban analogue à celui employé dans la machine à écrire. Ces deux modèles de pyrhéliographes permettent d'utiliser une pile thermo-électrique soit à grande soit à petite surface; la pile à petite surface est de 8 à 10 thermo-couples seulement d'une résistance totale de 10 ohms environ; grâce à la faible résistance interne de la pile, on obtient des déviations notables. Pour faciliter l'orientation, le support de la pile possède une petite graduation en degrés.

Avant l'essai, on amène le petit index sur le degré correspondant à la valeur de la déclinaison du soleil indiquée par une table des constances astronomiques.

Pyrhéliographe Kimball et Hobbs.

Comme dans le dispositif déjà décrit, le récepteur est constitué par une pile thermo-électrique d'un modèle spécial; les soudures chaudes et froides constituent deux couronnes juxtaposées dans un même plan; la première couronne est noircie, la seconde est, au contraire, brillante. La surface centrale des couronnes est également brillante de même que la surface extérieure. L'ensemble est monté au fond d'un tube Li qui s'oriente par un mouvement automatique.

Les thermo-couples sont constitués par un alliage d'or et de palladium (60 Au, 40 Pd) et de platine rhodié (90 Pt, 10 Rh) ; l'appareil mis au point par « Weather bureau » en Amérique, et par le « Bureau of Standards », fournit par un beau soleil, une F. E. M. de 5 à 10 millivolts suivant le modèle utilisé, qu'enregistre un voltmètre Engelhardt donnant un point à chaque minute.

Actinomètre Linke et Feussner.

Cet appareil, qui utilise également un galvanomètre et une pile thermo-électrique, se prête à la fois à la lecture directe et à l'enregistrement. Il a la forme d'un cylindre muni de plusieurs diaphragmes successifs dont l'ouverture augmente vers l'extérieur, la forme interne a été étudiée de manière à éviter que les mouvements externes de l'air se fassent sentir jusqu'à une pile thermo-électrique de Moll formée de 20 éléments manganine-constantan qui se trouve au fond du cylindre. Une autre pile identique se trouve dans l'appareil, mais protégée contre les radiations. Les mesures peuvent être faites par la méthode de compensation électrique.

On peut employer l'appareil soit sans filtre, c'est-à-dire en recevant la radiation totale, soit avec des filtres divers ne laissant passer qu'une partie du faisceau incident.

Mesures de l'albedo de la surface terrestre.

On désigne ainsi le rapport entre le rayonnement diffusé par la surface terrestre et le rayonnement incident. Il est intéressant de connaître ce rapport, non seulement pour l'ensemble des radiations, mais pour diverses régions du spectre. L'albédo relatif à l'ensemble des radiations peut être facilement mesuré au moyen du « pyranomètre ». Dans le cas des courtes longueurs d'onde, on a recours aux phénomènes photo-électriques.

Pour mesurer l'albedo relatif à une radiation quelconque susceptible d'impressionner la plaque photographique, on utilise un spectrographe à quartz dont la fente est recouverte d'une lame de quartz fumé. Cette lame disposée horizontalement est d'abord dirigée vers le haut puis tournée vers le bas de manière à obtenir sur la plaque même le spectre du faisceau incident et celui du faisceau diffusé.

3° Méthodes de mesure de la durée d'insolation

La durée d'insolation est le temps pendant lequel le soleil brille sans être masqué par les nuages. Elle constitue un facteur météorologique important surtout pour les études relatives à l'utilisation industrielle de la chaleur solaire.

1° *Héliographe de Campbell.*

Cette durée d'insolation fut d'abord mesurée dans les stations météorologiques à l'aide de divers héliographes dont le plus répandu fut celui de Campbell. Cet appareil est constitué par une sphère massive en verre disposée sur un support horizontal, dans un lieu bien découvert de manière que la vue du soleil n'y soit jamais masquée par un obstacle; une bande de carton est placée derrière la boule sur une monture sphérique concentrique, à une distance telle que le foyer des rayons traversant la boule se forme sur la bande. Le carton se trouve carbonisé à l'endroit où se forme l'image du soleil et, au cours du mouvement diurne, la trace de cette ligne a la forme d'un arc de cercle continu; si le rayonnement a été interrompu il sera coupé par des intervalles non carbonisés.

Cet appareil est encore utilisé, mais les résultats qu'il fournit manquent souvent de précision et de netteté.

2° *Héliographe de Pers.*

Le principe de l'instrument est simple. Considérons un réflecteur sphérique convexe R (fig. 7) ayant son axe OA orienté suivant la ligne des pôles PP' et confondu avec l'axe d'une lentille convergente L placée devant ce réflecteur.

Les rayons issus du soleil, après s'être réfléchis sur le miroir, tombent sur la lentille et donnent une image réelle qu'on peut fixer sur un papier sensible E .

Par suite du mouvement apparent du soleil autour de PP' , cette image décrit un cercle autour de l'intersection de l'axe PP' avec le papier sensible E . Toute interruption de l'insolation donne lieu à une coupure sur la courbe tracée par l'image du soleil.

Le réflecteur qui constitue la partie fondamentale de l'appareil, doit être limité par une surface de révolution très nette et inaltérable. Pers a utilisé un cylindre en verre (fig. 8) creusé d'une cavité sphérique C centré sur l'axe du cylindre,

cette cavité est hermétiquement close. Les surfaces cylindriques et sphériques étaient travaillées optiquement.

Un rayon SI provenant du soleil se réfracte en II' (fig. 8) ; la pièce cylindrique a été calculée de telle façon que le rayon II' subisse en I' une réflexion totale quelle que soit la déclinaison du soleil ; le rayon réfléchi tombe ensuite sur une lentille L qui, en définitive, fournit une image S' du soleil. Un tel réflecteur est inaltérable et très facile à nettoyer.

Les effets d'astigmatisme provenant des diverses réfractions et réflexions sont négligeables, grâce à la faible ouverture de l'objectif L. L'image S', très fine, permet d'obtenir des inscriptions très nettes ; en outre, l'appareil est orientable. L'enregistrement hebdomadaire se fait sur des papiers au citrate d'argent.

Pour mesurer les durées d'insolation, on commence par pointer le centre des arcs ainsi enregistrés, puis à l'aide d'un rapporteur de même diamètre on mesure les heures et les dixièmes d'heure qui correspondent à chaque arc.

3° Résultats.

Le tableau 1 donne à l'observatoire de « Blue Hill » les durées diurnes d'insolation d, et le rapport r entre les durées moyennes d'insolation observées et les durées théoriques.

TABLEAU I.

Janvier	4,81	0,34
Février	5,44	0,51
Mars	5,31	0,44
Avril	5,25	0,39
Mai	7,49	0,58
Juin	8,70	0,59
Juillet	7,66	0,52
Août	6,65	0,50
Septembre	5,94	0,47
Octobre	6,35	0,57
Novembre	5,00	0,35
Décembre	2,82	0,31

Le tableau II donne, pour Juvisy (France), les durées mensuelles d'insolation d' , les durées théoriques correspondantes

d'
 D' , et le rapport $r' = \frac{d'}{D'}$ entre les durées observées et théoriques.

A Montpellier, le nombre annuel d'heures d'insolation est de 2.285 au lieu de 4.380 (nombre théorique) ce qui fournit un rapport :

$$r = \frac{2285}{4380} = 0,521$$

TABLEAU II

Mois	d'	D'	r'
Janvier	15,7	268,4	0,06
Février	77,4	280,3	0,27
Mars	92,03	364,3	0,25
Avril	126,30	407,52	0,31
Mai	269,00	468,29	0,51
Juin	191,15	476,25	0,40
Juillet	212,50	478,57	0,43
Août	122,52	436,48	0,26
Septembre	120,30	371,08	0,32
Octobre	90,35	269,10	0,24
Décembre	25,00	251,35	0,10
Novembre	55,40	269,10	0,24

CHAPITRE III

1. — PERTES DU RAYONNEMENT SOLAIRE DANS L'ATMOSPHERE

Avant d'aborder les résultats des mesures de l'intensité du rayonnement solaire, il est intéressant d'envisager les pertes subies par ce rayonnement à travers l'atmosphère terrestre.

Trois facteurs principaux contribuent à l'affaiblissement de la radiation solaire :

1° La diffusion moléculaire produite par les divers gaz de l'air et aussi par la vapeur d'eau. Cette diffusion peut être calculée d'une manière précise.

2° L'absorption d'une partie du rayonnement par les mêmes corps.

Parmi les principaux constituants de l'air, l'azote et l'argon n'ont pas de bandes d'absorption connues. L'oxygène n'a qu'une bande d'absorption dans l'ultra-violet dont l'intensité énergétique est très faible et quelques raies fines dans le rouge. L'absorption exercée par ces trois éléments est donc très faible, et quasi négligeable. On peut également négliger l'absorption due aux gaz rares, aux composés nitrés et ammoniacaux qui n'existent qu'en très faible quantité dans l'air. l'anhydride carbonique qui y figure en proportions notables présente une bande d'absorption assez large dans une région correspondant à des longueurs d'onde supérieures à $12\ \mu$ où

l'intensité du rayonnement est très faible et une autre bande entre 4 et 5 μ , dans une région où cette intensité est plus considérable, mais où la vapeur d'eau présente une bande d'absorption plus importante. L'influence de l'anhydride carbonique peut donc être négligeable devant celle de la vapeur d'eau. C'est à celle-ci, en effet, qu'est due la principale absorption des rayons infra-rouges contenus dans le rayonnement solaire. Comme la vapeur d'eau existe dans l'atmosphère en quantités très variables, on conçoit que la proportion de l'énergie incidente qui se trouve ainsi absorbée, varie entre de larges limites. L'énergie qui disparaît dans l'absorption sélective est transformée en chaleur, en énergie cinétique ou chimique dans le milieu traversé.

3° La diffusion et l'absorption dues à des particules ou gouttelettes microscopiques qui existent surtout dans les couches basses de l'atmosphère terrestre et qu'on désigne sous le nom général de brumes, poussières ou troubles atmosphériques. Il convient aussi de mentionner l'absorption exercée par l'ozone.

En utilisant les coefficients de transmission mesurés au laboratoire et admettant que le rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère soit assimilable au rayonnement des corps noirs à 6.000° C. Dufay et Cabannes obtiennent pour la fraction de l'intensité totale absorbée par l'ozone des valeurs suivantes considérées d'ailleurs comme un peu fortes :

Ultra-violet	4 %
Spectre visible	0,5 %
Infra-rouge	0,1 %

Diverses formules théoriques ou empiriques ont été proposées qui permettent de calculer les pertes dues aux facteurs que nous venons de voir. Nous nous bornons à reproduire ici à titre d'indication, quelques-uns des résultats obtenus par BRAZIER, valables pour des observations faites à Saint-Maur par beau temps au milieu de chaque mois pour une distance zénithale de 73°5.

TABLEAU III

Mois	Epaisseur		Affaiblissement		Par les particules
	d'eau	totale	à sec	vap. d'eau	
Janvier	1,21	0,581	0,232	0,172	0,177
Février	1,24	0,582	0,232	0,174	0,176
Mars	1,28	0,612	0,232	0,177	0,203
Avril	1,47	0,621	0,232	0,190	0,199
Mai	1,89	0,636	0,232	0,215	0,189
Juin	2,21	0,617	0,232	0,234	0,151
Juillet	2,69	0,611	0,232	0,260	0,119
Août	2,59	0,609	0,232	0,255	0,128
Septembre	2,30	0,620	0,232	0,230	0,149
Novembre	1,48	0,577	0,232	0,191	0,154
Décembre	1,23	0,561	0,232	1,135	1,156

A. BOUTARIC a constaté d'autre part que l'affaiblissement de la radiation solaire est lié de manière assez étroite à la proportion de lumière polarisée contenue dans la lumière diffusée par le ciel à 90° du soleil ; même par des journées sans nuages, l'affaiblissement est d'autant plus grand que la proportion de lumière polarisée est plus faible.

Remarque. — Dans ce chapitre, nous nous sommes borné à envisager les pertes subies par le rayonnement solaire en un lieu donné. Il est bien évident que ces pertes sont influencées par l'altitude, la latitude du lieu et par l'inclinaison du soleil au moment des observations. Nous reviendrons sur cette question dans le chapitre suivant.

II. — CONSTANCE SOLAIRE

On appelle constante solaire l'intensité qu'aurait le rayonnement solaire si l'on pouvait le mesurer aux confins de l'atmosphère, le soleil étant supposé à sa distance moyenne de la terre.

Elle est mesurée par la quantité de chaleur que recevrait par minute une surface de 1 cm² exposée normalement aux rayons solaires à l'extrême limite de l'atmosphère.

La valeur I_0 de la constante solaire se présente donc comme la somme de l'intensité du rayonnement reçu à la surface du sol et de l'intensité qui correspondrait aux pertes subies dans l'atmosphère.

On peut obtenir une valeur approchée de cette constante en procédant de la manière suivante :

Sur un graphique on trace la courbe : $I = f(m)$ qui représente l'intensité I du rayonnement parvenant en un lieu donné aux différentes heures de la journée, en fonction de la masse d'air m traversée. On prolonge cette courbe jusqu'à l'axe des ordonnées, la valeur de l'ordonnée correspondant à $m = 0$ fournit la valeur cherchée. Malheureusement, comme la diffusion et l'absorption dépendent de la longueur d'onde, la courbe ainsi obtenue est loin d'être rectiligne et son point d'intersection avec l'axe des ordonnées ne peut être obtenue avec certitude (H. KIMBALL).

On peut aussi procéder par le calcul en admettant la relation de BOUGUER :

$$I = I_0 a^m$$

dans laquelle a désigne le coefficient de transmission.

Selon CROVA, cette méthode devrait pour être acceptable tenir compte des variations de l'état de l'atmosphère, aussi elle ne peut guère être utilisée que dans les cas où la courbe représentant les variations diurnes de l'intensité du rayonnement solaire en fonction du temps est symétrique par rapport à l'ordonnée correspondant à midi. Cet auteur conseille de faire les mesures dans une station élevée où les pertes de rayonnement sont plus faibles et où l'atmosphère demeure relativement pure.

D'ailleurs, comme la formule de BOUGUER n'est valable que pour une radiation monochromatique, le coefficient d'absorption n'étant pas le même pour toutes les radiations émises, on ne peut appliquer la formule de BOUGUER à l'ensemble des radiations que comprend le rayonnement solaire ; la formule à appliquer devrait être de la forme :

$$I = I_{01} a_1^m + I_{02} a_2^m + I_{03} a_3^m + \dots$$

qui assignerait à la constante solaire l'expression :

$$I_0 = I_{01} + I_{02} + I_{03} + \dots$$

D'où la nécessité de connaître les coefficients de transmission a_1 , a_2 , a_3 , pour les diverses radiations et de déterminer séparément l'intensité de chaque radiation pour deux valeurs au moins de la masse d'air traversée. Cette méthode n'est pas applicable d'une manière absolue en tout lieu.

Méthode du spectrobolomètre.

Cette méthode repose sur l'emploi d'un spectroscopie construit de façon que des régions très restreintes du spectre solaire viennent successivement impressionner un bolomètre dont l'échauffement peut être mesuré à l'aide d'un thermomètre à résistance. Un montage spécial qui comporte un galvanomètre permet de photographier à chaque instant les déplacements du cadre du galvanomètre dus à l'action d'une certaine région du spectre solaire.

L'appareil fournit donc directement les intensités relatives du rayonnement solaire en fonction de la longueur d'onde.

En utilisant les résultats que donnent les six hologrammes qu'on peut obtenir au cours d'une demi-journée de mesures on peut tracer les courbes qui représentent pour chacune des régions étroites du spectre qui ont défilé devant le bolomètre, les logarithmes de ces intensités en fonction des masses d'air traversées.

L'intersection de ces courbes avec l'axe des ordonnées fait connaître la valeur de l'intensité relative correspondant à une masse d'air nulle. On a ainsi toutes les données nécessaires au calcul de la constante solaire.

Des mesures auxiliaires effectuées à l'aide d'un pyrhéliomètre permettent d'obtenir la valeur absolue de cette constante.

La méthode spectrobolométrique comporte quelques causes d'erreurs, dont il n'est pas toujours facile de tenir compte. En particulier certaines corrections doivent être apportées aux enregistrements photographiques ; d'autre part il n'est pas exact, comme on le suppose implicitement dans le calcul des intensités, que les coefficients de transmission restent invariables pendant la durée totale d'une série d'observations.

Méthode du pyranomètre.

Pour obvier à ces inconvénients, les observateurs de la Smithsonian Institution en Amérique ont adopté une méthode plus rapide.

1° On mesure l'état du ciel dans une couronne étroite entourant le soleil.

2° A l'aide des bandes d'absorption de vapeur d'eau que l'on peut obtenir à partir de la courbe du spectrobolomètre, on peut déduire la quantité de vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère. Le pyranomètre étant étalonné, on peut obtenir la valeur de la constante solaire par des formules empiriques qui ne sont valables que pour chaque station.

En résumé, cette méthode mesure la valeur de l'intensité solaire à la surface terrestre et y ajoute la valeur de la perte due seulement à l'absorption de la vapeur d'eau contenue dans l'atmosphère.

Autres méthodes de mesure de la constante solaire.

1° On reçoit le rayonnement sur un appareil calorimétrique aux différentes heures de la journée, l'épaisseur de l'atmosphère traversée par les rayons varie ; on peut évaluer la variation de l'absorption, en déduire l'absorption totale et par suite la quantité de chaleur arrivant aux confins de l'atmosphère.

2° On effectue des mesures calorimétriques à diverses altitudes, ce qui donne une autre manière d'évaluer les différences d'absorption et par suite l'absorption totale (VIOLE, CROVA, FERRY, C. ABBOT). Pour obtenir quelque précision, il est nécessaire, pour des raisons déjà indiquées, de faire porter les mesures sur les diverses radiations du spectre. ABBOT donne comme résultat de ses mesures les plus récentes $1,932 \text{ cal-g: cm}^2\text{-min.}$

TABLEAU IV

Auteurs	Année	Constante solaire
Crova	1876	3
Abbot	1902	1,933
	1905	1,961
	1906	1,936
	1908	1,942
	1909	1,925
	1910	1,918
	1911	1,943

Variation de la valeur de la constante solaire.

Etudiant la courbe des moyennes mensuelles de la valeur de la constante solaire pour la période de 1920 à 1930, au moyen d'un pyrhéliomètre, Madame GALDYS BAND de la « Smithsonian Institution », a remarqué que cette courbe peut se décomposer en plusieurs autres de périodes égales à 7, 8, 11, 21, 25, 68 et 135 mois.

Le tableau V donne en pour-cent, les variations de la constante solaire d'après Ch. MAURAIN *et* H. KIMBALL.

TABLEAU V

Mesures faites à « Mont Wilson » (Amérique).

Années	Variation en %
1906	1,4
1908	1,1
1909	1,3
1911	1,4
1912	2,3 (Katamao)
1913	1,7
1914	1,3
1915	1,05
1917	1,3
1919	0,9

Influence des taches solaires.

C. ABBOT avait conclu, d'après des expériences qui durèrent 20 ans, que la valeur de la constante solaire varie en sens inverse du nombre des taches solaires ; malheureusement il avait établi cette conclusion sur des mesures qui furent faites dans les pays tropicaux ; mais F. BAUR a démontré que malgré le parallélisme de la valeur de la constante solaire et le nombre de taches solaires, cette relation n'existe pas en tout lieu du globe.

F. BAUR a été conduit à admettre que les variations de la constante solaire ne sont ni parallèles ni opposées aux variations du nombre de ces taches et que le soleil, en définitive, peut être considéré comme une étoile variable.

Les variations observées sur le soleil, ne sont parallèles ou opposées à la marche des taches solaires que dans une région bien déterminée du globe, c'est du moins ce que BAUR a vérifié pour des observations faites dans quelques îles du Pacifique et de l'Océan Indien.

On voit que l'influence du nombre des taches solaires sur la valeur de la constante solaire est loin d'être définitivement élucidée. Il est peut-être plus rationnel, comme l'ont fait C. ABBOT, F. FOWLE et H. ALDRICHE, d'imputer les variations de valeur de la constante solaire aux erreurs expérimentales que comportent toujours les mesures délicates relatives à la détermination de cette constante.

CHAPITRE IV

RESULTATS DES MESURES DE L'INTENSITE DU RAYONNEMENT SOLAIRE

Introduction. — A partir des valeurs de la constante solaire C, on peut calculer la quantité totale de chaleur reçue par la surface terrestre, pendant une journée, abstraction faite des pertes dues à la traversée de l'atmosphère. En adoptant pour C la valeur 1,93 admise par Abbot, et désignant par R le rayon terrestre, on a :

$$Q = 1,93 \times 24 \times 60 \times \pi \times R^2$$

La valeur moyenne de l'intensité du rayonnement solaire par jour et par cm² devrait donc être égale à :

$$\frac{1,93 \times 24 \times 60 \times \pi \times R^2}{4 \times \pi \times R^2} = 700 \text{ cal.}$$

En réalité, la valeur réelle n'atteint guère que 300 cal. par suite de l'influence des divers facteurs notamment de l'absorption atmosphérique. Nous nous proposons d'examiner ici comment varie l'intensité, en un lieu donné au cours d'une même journée. Nous essaierons également de préciser l'influence de l'altitude du lieu d'observation ainsi que celle de la quantité de vapeur d'eau, de la proportion de la lumière polarisée et des facteurs accidentels comme les éruptions volcaniques.

Variations diurnes.

De nombreuses observations ont montré que, par temps clair, l'intensité I de la radiation solaire augmente à partir du lever du soleil, atteint un maximum vers midi, puis diminue régulièrement jusqu'au coucher du soleil, en passant sensiblement par les mêmes valeurs que dans la matinée. C'est du moins ce que fournit un examen sommaire des résultats obtenus. Le tableau VI donne, à titre d'indication, les résultats des mesures faites par CROVA à Montpellier le 9 septembre 1886.

TABLEAU VI

Heures	Cal. g: cm ²
7	0,607
8	0,788
9	0,915
10	0,987
11	1,016
12	1,037
13	1,016
14	0,987
15	0,915
16	0,788
17	0,610

Diverses formules ont été proposées pour représenter la variation diurne de l'intensité ; d'après CROVA on aurait :

$$I = \frac{C}{(1 + \zeta)^p}$$

dans laquelle C désigne la constante solaire.

p un coefficient dépendant de l'absorption atmosphérique et croissant avec celle-ci,

ζ un paramètre qui croît proportionnellement à la masse d'air m traversée par les rayons.

En réalité la loi de CROVA ne traduit pas exactement les faits et le phénomène est plus complexe ; voyons comment se présentent les choses à Montpellier.

Par de belles journées, sans nuages, l'intensité du rayonnement augmente rapidement à partir du lever du soleil, de manière d'abord assez régulière, puis après quelques oscilla-

tions sans cause apparente, atteint un maximum entre 10 et 12 heures et va en s'affaiblissant jusqu'au soir. Il arrive parfois qu'il augmente à nouveau l'après-midi et atteint un maximum qui reste toutefois inférieur à celui de la matinée ; Crova interprète le phénomène observé de la manière suivante :

Après une nuit sereine, le sol et l'air voisin, s'échauffent peu à peu dès le lever du soleil. Cet échauffement donne lieu à la formation d'une quantité variable de vapeur d'eau qui dépend notamment du degré d'humidité du sol.

La vapeur présente dans l'atmosphère exerce une absorption de plus en plus forte sur la radiation solaire, mais l'intensité de celle-ci augmente rapidement à mesure que le soleil s'élève. Comme les deux phénomènes ne s'effectuent pas avec la même vitesse, on conçoit que l'intensité du rayonnement reçu à la surface terrestre puisse passer par une série d'oscillations irrégulières ; il n'est pas surprenant que le maximum se produise généralement avant midi, car il arrive un moment où les variations de l'intensité du rayonnement émis par le soleil deviennent de plus en plus faibles à mesure que le soleil s'approche du zénith et sont compensées par l'augmentation de l'absorption due à la vapeur d'eau, l'influence de celle-ci peut même devenir prépondérante pendant un certain temps.

Des considérations analogues permettent d'interpréter le maximum qu'on observe parfois au cours de l'après-midi.

Variations annuelles de l'intensité.

Les variations qu'éprouve, au cours de l'année, l'intensité en un lieu quelconque, toujours très faibles dans les régions tropicales, sont de plus en plus notables lorsqu'on s'approche des pôles. Elles dépendent surtout de la transparence de l'air ; l'air chaud et humide étant beaucoup plus absorbant que l'air froid, même si, comme il arrive en hiver par suite de la distance du soleil à la terre, l'air se trouve sous une plus grande épaisseur. C'est ce que montre le tableau VII qui fournit la moyenne des maxima de l'intensité pour diverses stations et divers mois de l'année au cours d'une période s'échelonnant de 1924 à 1927. On voit que les maxima les plus considérables ne s'observent pas, en général, pendant les mois les plus chauds de l'année.

On a remarqué que les variations annuelles de l'intensité sont plus accentuées pour les stations à haute altitude que pour les stations à faible altitude.

TABLEAU VII

Variations mensuelles pour quelques stations pendant quelques années.

Mois	Ariana	Montpellier	Paris
Février	1,59	1,50	1,32
Janvier	1,54	1,38	1,21
Mars	1,61	1,45	1,37
Avril	1,56	1,45	1,43
Mai	1,61	1,48	1,42
Juin	1,54	1,42	1,40
Juillet	1,52	1,49	1,37
Août	1,46	1,46	1,37
Septembre	1,46	1,49	1,38
Octobre	1,54	1,46	1,30
Novembre	1,61	1,49	1,19
Décembre	1,51	1,47	1,18

Variation avec la latitude.

Le tableau VIII extrait des mémoires de KIMBALL fournit les valeurs annuelles de l'intensité du rayonnement solaire, ainsi que l'altitude et la latitude des stations d'observation.

Il est difficile d'obtenir une comparaison nette entre ces résultats, étant donné que ces stations ne se trouvent pas à des altitudes identiques et que, pour cette raison et d'autres, les conditions d'affaiblissement par l'atmosphère ne sont pas les mêmes. On peut toutefois remarquer que d'une façon générale cette décroissance n'est pas marquée.

TABLEAU VIII

Moyenne de l'intensité du rayonnement solaire aux diverses latitudes.

Stations	Latitude	Altitude	Moyenne de l'int. annuelle
Léningrad	59,56	5	1,18
Halde	56,50	290	1,01
Varsovie	52,15	120	1,08
Kew	51,28	6	0,91
Saint-Maur	48,49	50	1,08
Florence	43,46	73	1,14
Montpellier	43,39	51	1,16
Tacubaya	19,24	2309	1,43
Atlantique	12 S	0	1,36
Océan Indien	12 N	0	1,38
Méditerranée	32,4N	0	1,38
Atlantique	42 S	0	1,39

Influence de l'altitude.

L'absorption atmosphérique dépend de l'altitude du lieu. En évaluant les masses d'air en épaisseurs d'air traversées et prenant comme unité d'épaisseur celle qui correspond à la position du soleil au zénith on démontre que la masse d'air traversée qui correspondrait à une position quelconque du soleil, est sensiblement égale à la sécante de la distance zénithale du soleil ; elle est, par exemple, égale à 2 lorsque le soleil est à 60° du zénith.

Le tableau IX où se trouvent consignées les valeurs maxima de l'intensité pour quelques stations situées à des latitudes égales ou très voisines, donne une idée du phénomène et montre qu'en général, ces valeurs diminuent en même temps que l'altitude.

TABLEAU IX

Variation de l'intensité de la radiation solaire en fonction de l'altitude.

Station	Altitude	Latitude	Intensité
Mont Rose	4560	46	1,77
Zugspitze	2960	47	1,67
Arosa	1860	46	1,63
Feldberg	1390	48	1,49
Saint-Blasien	790	48	1,44
Saint-Maur	50	49	1,43
Montpellier	43	44	1,50

Influence de la proportion de lumière polarisée.

A. BOUTARIC a tracé des courbes horaires des intensités calorifiques relatives à des journées peu éloignées ; dans ces conditions les masses d'air traversées aux mêmes heures, sont très voisines et peuvent être considérées comme identiques. La comparaison de ces courbes l'a conduit aux conclusions suivantes :

1° Les intensités calorifiques sont d'autant plus grandes que la polarisation de la lumière est elle-même plus grande.

2° A la même heure de la journée, l'intensité calorifique est d'autant plus élevée que la polarisation de la lumière est plus grande.

3° Une courbe est symétrique par rapport à l'ordonnée de 12 heures si la polarisation conserve une valeur à peu près constante. Cette courbe n'est pas symétrique à l'ordonnée de 12 heures et elle est très aplatie quand la polarisation diminue progressivement depuis le matin.

4° Deux courbes correspondant à des journées rapprochées coïncident presque l'une avec l'autre si, aux mêmes heures, la polarisation a la même valeur pendant ces deux journées.

Influence de la richesse de l'atmosphère en vapeur d'eau.

Le tableau III (Chapitre III) nous montre aisément l'influence de la richesse de l'atmosphère en vapeur d'eau. On remarque que l'affaiblissement dû à la vapeur d'eau aug-

mente en même temps que la quantité de cette vapeur dans l'atmosphère ; il en résulte que le maximum absolu de l'intensité du rayonnement solaire ne s'observe pas en général ni à 12 heures ni dans les mois les plus chauds. D'ailleurs nous avons vu que sa présence est la cause des oscillations que Crova a observées à Montpellier.

CHAPITRE V

UTILISATION DE LA CHALEUR SOLAIRE POUR LE CHAUFFAGE DE L'EAU DOMESTIQUE

Les chauffe-eau utilisés pour les besoins domestiques doivent être avant tout des appareils robustes fonctionnant sans surveillance spéciale. Les insolateurs qui leur sont destinés ont une forme plate et ne comportent pas de réflecteurs ; ils sont orientés du nord au sud et inclinés sur l'horizontale d'un angle égal à la latitude du lieu de façon que les rayons solaires les frappent normalement à midi.

Comme la proportion de lumière réfléchie augmente avec l'angle d'incidence, les résultats obtenus n'offrent un intérêt pratique que lorsque le soleil se trouve à une hauteur suffisante au-dessus de l'horizon (au moins 20° pour l'insolateur en verre). C'est d'ailleurs pour cette raison que les machines solaires ne peuvent guère être utilisées qu'aux latitudes inférieures à 40° .

L'insolateur qui avec le réservoir d'eau constitue la partie essentielle d'une installation de chauffage, comporte soit une caisse plate vitrée peu profonde disposée sur le toit et renfermant un serpentin ou un système tubulaire, soit une plaque creuse faisant office de chaudière. Dans l'appareil de C. ABBOT, le serpentin est en fer galvanisé, recouvert de spires, celles-ci sont soudées à des feuilles de cuivre, ce qui augmente la surface d'absorption.

Le réservoir est relié au serpentin par deux tuyaux soigneusement calorifugés. En réalité, on a affaire à un chauffage par thermo-siphon, et la circulation d'eau entre les deux parties de l'appareil est d'autant mieux assurée que la différence de niveau entre le réservoir et l'insolateur est plus grande. Bien entendu, le tuyau de circulation d'eau doit être aussi court que possible.

Le serpentin prend l'eau froide au fond du réservoir pour l'amener chaude à la partie supérieure. Les robinets S et S' (fig. 9) permettent d'isoler le serpentin et d'effectuer la vidange par le robinet V. Un petit tube E disposé à la partie supérieure du réservoir permet aux gaz dissous dans l'eau de s'échapper.

Pour que la prise d'eau chaude ne puisse se désamorcer, le réservoir doit rester rempli jusqu'au-dessus du coude D, à cet effet il est alimenté par un petit réservoir à flotteur B placé à un niveau supérieur. L'eau froide, après avoir traversé une tôle perforée, pousse l'eau chaude vers le haut sans se mélanger avec elle.

Un réservoir de 150 à 200 litres suffit pour alimenter une maison d'un étage ayant une salle de bains et une buanderie. Par temps clair, 15 à 20 minutes de marche suffisent pour obtenir de l'eau chaude qui peut être utilisée ultérieurement et même la nuit si l'appareil est suffisamment calorifugé.

Soit T la température de la masse d'eau M contenue dans le réservoir ; au bout d'un temps ΔX , elle s'abaisse de ΔT , et la quantité de chaleur perdue est $M \Delta T$. Si S est la surface de refroidissement du réservoir, K le coefficient de transmission de la chaleur à travers cette surface et la température ambiante, on a :

$$K S (T - t) \Delta x = M \Delta T$$

on en tire :

$$\frac{dT}{dX} = \frac{KS}{M} (T - t)$$

La vitesse de refroidissement $\frac{dT}{dX}$ à l'instant considéré

est proportionnelle à l'excès de température du réservoir sur la température ambiante.

De l'expression précédente, on tire :

$$dX = \frac{M}{KS} \frac{dT}{(T - t)}$$

ce qui fournit pour un abaissement de température de T_1 à T_2

$$X = \frac{M}{KS} \int_{T_1}^{T_2} \frac{dT}{(T - t)}$$

On voit que la durée X de refroidissement est d'autant plus grande que K est plus petit, c'est-à-dire que l'isolement thermique est mieux réalisé, et que la capacité du réservoir est plus grande, mais il convient de remarquer que le temps nécessaire au chauffage augmente dans le même sens.

Appareil Insol.

L'un des inconvénients de l'appareil précédent, réside dans les dépôts de tartre à l'intérieur du serpentín : ces dépôts peuvent réduire l'échange de chaleur et le débit d'eau.

Pour obvier à cet inconvénient, la société « La Thermique Naturelle » a réalisé un chauffage indirect du réservoir. Le liquide chauffé directement n'est plus l'eau, il circule par thermosiphon entre l'insolateur et une cavité annulaire ménagée à l'intérieur du réservoir, c'est la surface de cette cavité qui sert de surface de chauffe. Le liquide retourne à l'insolateur et sert indéfiniment. Il doit être pratiquement incongelable, ne s'évaporer qu'à des températures dépassant 100° , et avoir assez de fluidité pour circuler librement dans les tuyaux. On utilise à cet effet des huiles végétales (arachide, ricin) ou des mélanges de liquides appropriés (eau glycinée à 36 % par exemple). Après de nombreux essais, on a adopté un liquide de composition tenue secrète.

L'insolateur constitué par un réseau tubulaire plat, qui a quelque analogie avec les radiateurs de chauffage central, est disposé dans un bac vitré à doubles parois, rigoureusement calorifugé et protégé extérieurement de façon à résister aux intempéries.

Une petite installation comporte un insolateur de $0,35 \times 0,85$ mètres avec réservoir de 50 à 70 litres. Pour une villa avec salle de bains on utilise un ou deux isolateurs de $1,53 \times 0,85$ mètres avec réservoir de 200 à 300 litres.

Nouvel appareil d'Abbot.

En 1936, Abbot installa en Californie un appareil qui fonctionnant par gravité, est alimenté par l'eau de la ville ; il peut être considéré comme un appareil automatique (fig. 10).

L'insolateur comporte un châssis directement fixé dans une légère dépression pratiquée dans le toit de la maison. Le fond du châssis est en métal noirci et le couvercle est en verre. Un serpentín disposé dans le châssis communique avec un réservoir qui est relié à l'eau de la ville, et qui se trouve disposé à un niveau aussi élevé que possible par rapport à celui du serpentín. L'autre extrémité du serpentín communique avec le réservoir accumulateur de chaleur.

Résultats obtenus.

D'après l'expérience effectuée dans la Gironde au mois de janvier 1939 à 8 heures du matin, trois appareils Insol, contenant le premier de l'eau de ville, le deuxième de l'eau chargée de sel marin, le troisième de l'huile minérale, ont fourni les résultats suivants :

Appareil	1	2	3
Température initiale	22°	20°	21°
Température d'ébullition ...	100°	106°	112°
Temps nécessaire	3 h. 27 m.	4 h. 32 m.	5 h. 43 m.

Ce tableau, à titre documentaire, montre que les installations de chauffe-eau utilisant l'énergie solaire, peuvent être utilisées dans les pays tempérés, notamment en France. Bien entendu, ils seraient plus efficaces encore dans les pays au climat plus chaud comme l'Algérie, la Tunisie, l'Egypte...

CHAPITRE VI

APPLICATION DE LA CHALEUR SOLAIRE A LA DISTILLATION DE L'EAU ET AUX USAGES DOMESTIQUES

1° Utilisation de la chaleur solaire pour la distillation de l'eau

Admettons que, en raison des pertes diverses, la quantité de chaleur utilisable, reçue par une surface de 1 m², disposée normalement aux rayons solaires soit de l'ordre de 3×10^6 cal. g. jour.

Pour transformer un gramme d'eau à 0° en vapeur à 100°, il faut, d'après Regnault, mettre en jeu une quantité de chaleur égale à 637 calories.

En réalité, si l'eau d'alimentation est à 25°, cette quantité se réduit à 610 cal. environ ; il en résulte que la masse d'eau qui peut être évaporée par jour et par mètre carré de surface d'insolation est de l'ordre de :

$$\frac{3 \times 10^6}{610} = 5.000 \text{ g.}$$

Une partie de la chaleur absorbée peut d'ailleurs être récupérée pendant la condensation de l'eau, et être utilisée pour chauffer l'eau soumise à la distillation.

Appareil J. Harding (fig. 11).

Cet appareil, imaginé par Ch. Wilson (1872), a été utilisé sous des formes plus perfectionnées par J. Harding, J. Richard et Ch. Maurain. Le dispositif de Harding qui effectua ses essais dans les mines de nitrate de soude à Salina (Chili)

comporte 70 châssis de 50 m. de longueur, 1,20 de largeur et 0,15 de profondeur, ce qui porte la surface totale d'insolation à environ 5.000 m² ; chacun des châssis est muni d'un couvercle en verre ordinaire ayant la forme d'un V renversé et très ouvert, l'épaisseur du couvercle joue un rôle fondamental dans le phénomène ; J. Richard a montré que le rendement peut être amélioré par une augmentation de son épaisseur, cette dernière opération facilite, en effet, la condensation de l'eau, en augmentant la différence de température entre le milieu ambiant et l'intérieur du châssis. Maurain avait pensé à améliorer le rendement en modifiant la forme du couvercle et en remplaçant le verre par un métal, mais ses prévisions ne furent pas vérifiées par l'expérience.

L'eau du canal principal s'échauffe sous l'action du soleil, s'évapore et après s'être condensée sur les vitres du châssis, s'écoule par un petit canal latéral.

Le maximum de température adopté est de 65°. La quantité d'eau vaporisée atteint 4.800 g. par jour et par m². L'inconvénient de cet appareil réside dans la fragilité des vitres qui peuvent se briser facilement sous l'action de vent violent.

Le dispositif utilisé par Ch. Maurain au Parc Saint-Maur, à Paris, comportait un seul châssis, la surface du fond était de 0,35 m². Les expériences, qui ont duré 14 jours, ont fourni les résultats indiqués dans le tableau X.

La quantité totale d'eau distillée n'a été que de 3211 g., ce qui correspond à une moyenne de 716,2 g. par jour et par mètre carré de surface d'insolation, le rendement était par conséquent très modéré, ce qui peut s'expliquer par de mauvaises conditions atmosphériques qui n'ont permis qu'une insolation irrégulière et peu importante en moyenne. Le tableau X donne à titre d'indication, les quantités d'eau distillée par heure entre 10 h. et 16 h. pour une période s'étendant entre le 10 et le 20 septembre 1926. Ces quantités sont exprimées en g : m², on voit qu'elles sont très variables et entre les mêmes heures, elles peuvent varier dans le rapport de 1 à 4 et même de 1 à 10.

L'auteur constate que la distillation n'a pas uniquement lieu pendant les heures d'insolation ; toutefois le rendement n'est vraiment intéressant qu'entre 13 et 20 heures. Il atteint son maximum entre 15 et 16 heures. L'auteur fait également remarquer que si l'on concentrait au moyen de miroirs sphé-

riques ou paraboliques, les rayons du soleil sur le châssis, le rendement serait nettement supérieur.

J. Richard utilisant un dispositif analogue, obtient à Monaco 338 g : m² par heure d'insolation.

Ginestous a songé à alimenter le châssis avec de l'eau déjà chauffée par le soleil ; à cet effet, l'eau traverse une boîte métallique noircie, protégée par une double paroi de verre, où elle atteint une température de 60 à 70°. On peut grouper un grand nombre d'éléments (30 éléments disposés suivant trois lignes parallèles de 10 éléments chacune). Une telle installation s'est révélée susceptible de fournir à Ben-Gardan au mois de mai, 80 litres d'eau distillée par jour. L'alimentation était assurée à l'aide d'un bassin distributeur à flotteur, une gouttière collectait l'eau distillée pour l'amener à un réservoir. La surface d'insolation avait 19 m² 89.

Les avantages de l'appareil Harding résident dans son faible prix de revient, dans son fonctionnement quasi-automatique ininterrompu.

Appareil d'Abbot (fig. 12).

Abbot, tout en conservant le dispositif de Harding, a cherché à augmenter la quantité d'eau distillée dans un temps donné, sans avoir à augmenter la surface d'insolation proprement dite. Il y est parvenu en utilisant des réflecteurs à miroirs. Mais cette adjonction relativement coûteuse, présente en outre, divers inconvénients : la surface des miroirs doit être entretenue avec soin, il faut d'autre part effectuer assez souvent un nouveau réglage de l'appareil, si l'on veut que l'action des miroirs soit efficace, Abbot obtient 7.000 g. d'eau par jour et par mètre carré.

Appareil de Poulain et Ginestous (fig. 13).

Poulain et Ginestous utilisent un miroir concave de 3 m. de diamètre, au foyer duquel se trouve disposée la chaudière. La vapeur produite est condensée par un système de réfrigération placé à l'arrière du miroir et permettant de récupérer la plus grande partie de la chaleur reçue. La surface réfléchissante proprement dite, qui atteint 7,5 m², est constituée par 48 miroirs élémentaires en laiton très mince, fixés sur une charpente en forme de calotte sphérique. Le laiton a

été nickelé et poli sur la face concave, ainsi que les couvre-joints interposés entre les miroirs.

L'axe optique du miroir peut être constamment maintenu dans la direction du soleil par la combinaison de deux mouvements de rotation dans un plan horizontal et vertical.

Dans un essai effectué à Ariana en Tunisie, ces auteurs ont obtenu 3376 g. d'eau distillée par jour et par mètre carré.

Conclusion. — Les résultats des expériences que nous avons relatées sont, à l'exception des résultats d'Abbot, inférieurs à la valeur que nous avons indiquée au début de ce chapitre ; il est d'ailleurs assez difficile de les comparer entre eux, puisqu'ils ont été obtenus sous des cieux différents et avec des appareils qui n'étaient pas identiques.

TABLEAU X

Quantité d'eau distillée heure par heure par centimètres cubes au Parc Saint-Maur (septembre 1926) :

Date	10-11	11-12	12-13	13-14	14-15	15-16
10 sept.	5,6	11,2	26,6	36,5	47,7	49,1
11 —	8,4	21	21	35	35	35
12 —	5,6	7	8,4	14	16,8	19,6
13 —	5,6	8,4	11,1	14	16,8	21
14 —	1,4	7	8,4	15,4	16,8	21
15 —	4,2	7	12,6	12,6	22,4	21
16 —	2,8	4,2	4,2	4,2	4,2	7
17 —	2,8	14	26,6	39,4	46,3	51,9
18 —	4,2	14	26,6	33,7	39,4	43,5
19 —	4,2	7	22,4	42,1	42,1	49,1
20 —	4,2	7	7	7	11,2	21

2° Utilisation de la chaleur solaire pour les usages culinaires

L'utilisation de la chaleur solaire pour les usages culinaires remonte à la plus haute antiquité. Pour cuire le pain, les anciens égyptiens utilisaient des fours rudimentaires constitués par un bloc de basalte. Il semble donc qu'ils connaissaient au moins empiriquement, les propriétés absorbantes des corps noirs ; ces fours subsistent encore en Egypte (Haute-Egypte) sous leur forme primitive ; ils sont toutefois munis d'un couvercle de verre (il est assez curieux de noter à ce sujet que

les paysans qui utilisent ces fours pensent que le couvercle de verre est uniquement destiné à protéger la pâte contre l'action de la poussière). Dans ces fours, la fermentation et la cuisson se produisent simultanément ; le pain obtenu, quoique trop fermenté, a une saveur agréable.

Expériences de Mouchot.

En 1877, Mouchot fit de nombreuses expériences avec des appareils qu'il avait construits pour servir à des besoins domestiques ; parmi ces appareils il convient de mentionner tout particulièrement un bouilleur et un four de campagne. L'installation du bouilleur comporte : un miroir conique en cuivre argenté ayant 18 dm² de surface d'insolation normale, un manchon en verre installé au foyer du miroir et une petite chaudière à parois noircies que l'on dispose à l'intérieur du manchon. Avec ce dispositif, on pouvait rapidement obtenir de l'eau chaude et même bouillante. Sa contenance est d'environ 0,75 litre (fig. 14).

Le four de campagne utilisait comme agent de chauffage, la vapeur produite par un bouilleur analogue à celui que nous venons de décrire. Il permettait la cuisson du pain, de la viande...

Appareil d'Abbot, Aldriche et Fowle.

Des essais analogues à ceux de Mouchot ont été réalisés au mont Wilson par Abbot, Aldriche et Fowle ; leur appareil comporte un miroir cylindrique à section parabolique de 3 2,10 m. constitué par des lames minces d'acier doux poli ; la surface réfléchissante est protégée par une lame de verre contre les agents atmosphériques, ce qui réduit le rendement de 15 % (fig. 15).

La chaudière se compose essentiellement d'un tube noirci protégé par un tube en verre et disposé suivant le plan focal du miroir. Dans le tube circule par thermo-siphon, de l'huile qui alimente un réservoir où l'on peut procéder aux opérations culinaires que l'on désire. Au cours des premiers essais, la température atteint 130°.

Les miroirs furent, par la suite, garnis de feuilles d'aluminium dont le pouvoir réflecteur est de 77,3 %, ce qui permit à Abbot d'atteindre un rendement de 56 % et une température de 150°.

En 1923, pendant leur séjour au mont Wilson, M. et Mme Abbot effectuèrent de nouveaux essais après avoir légèrement modifié l'appareil ; le tube chauffant à l'huile ayant été entouré d'un tube annulaire de verre Pyrex dans lequel on a fait le vide ; cette modification s'est montrée avantageuse ; la température atteignit 175°.

En 1938, Abbot remplaça l'huile par l'« arochlora » additionné de noir de fumée (produit spécial fabriqué en Amérique sous ce nom), ce produit a l'avantage de ne bouillir qu'à 350° sans émettre de vapeurs, il peut être utilisé longtemps sans altération. Abbot construisit également un petit four de $12 \times 10 \times 7$ cm. muni d'un réflecteur approprié ; ce petit four à arochlora permettrait de cuire un gâteau de 10 cm² en une demi-heure.

CHAPITRE VII

APPLICATION DE LA CHALEUR SOLAIRE POUR LA PRODUCTION DE FORCE MOTRICE

A notre connaissance, la première tentative d'utilisation de la chaleur solaire à la production de force motrice, remonte à Salomon de Caus qui, en 1605, donnait la description de son invention dans un livre intitulé « La raison des forces mouvantes ». Cet ingénieur se proposait de construire une machine élévatoire. A cette machine, disait-il, on pourrait attribuer le titre de « fontaine continuelle », à raison que l'eau, laquelle de sa nature cherche le plus bas lieu, est élevée ici par le moyen du soleil. »

Voici le principe : une masse d'air est enfermée dans un récipient au-dessus d'une masse d'eau chauffée par le soleil ; sous l'action de l'augmentation de pression, l'eau s'élève dans un tuyau en soulevant une soupape et peut être ainsi accumulée dans un réservoir. Quand le soleil cesse d'agir, la pression de l'air diminue, la première soupape se ferme et une seconde soupape s'ouvre qui établit la communication entre le récipient et la nappe d'eau à élever. En somme ce dispositif peut être comparé à une machine à piston fournissant un coup de piston par jour, au moyen d'un écran disposé de manière à intercepter périodiquement les rayons du soleil.

Kircher (1602-1680) qui construisit diverses machines solaires, reconnut l'avantage d'enfermer l'air dans une enceinte vitrée.

Expérience de Mouchot.

Mouchot semble être le premier inventeur qui ait réussi à faire fonctionner d'une manière rationnelle, un moteur, plus exactement une sorte de machine à vapeur, en utilisant uniquement la chaleur solaire comme source d'énergie. Celle-ci était concentrée sur une chaudière à l'aide d'un miroir conique constitué par douze secteurs en argent plaqué, ayant une ouverture de 2,6 m. et une surface de 4 m². « Le fond du miroir, écrit Mouchot, est un disque de fonte, ajouré pour diminuer l'effort du vent. Au centre de ce disque s'élève la chaudière dont la hauteur est celle du miroir. Elle est en cuivre noirci extérieurement et se compose de deux enveloppes concentriques, en forme de cloche, reliées par une bride de fer. La plus grande enveloppe a 0 m. 8 de hauteur, la plus petite a 0 m. 5, leurs diamètres sont de 0 m. 28 et 0 m. 22. L'eau d'alimentation se loge entre ces deux enveloppes ; le volume du liquide ne doit guère excéder 20 litres. L'enveloppe interne reste vide ; elle est terminée par un tube de cuivre qui s'ouvre d'un côté dans la chambre de vapeur et communique de l'autre par un tuyau flexible soit avec le moteur soit avec le fourneau d'un alambic. Un second tuyau flexible partant du pied de la chaudière sert à son alimentation.

Au cours des essais effectués le 2 septembre 1878 au Trocadéro, l'appareil permit de porter à l'ébullition 70 litres d'eau en une demi-heure. Le 22 septembre il actionna une pompe qui éleva en une heure 1.800 litres d'eau à 2 m.

Appareil du Docteur Haro.

Le Docteur Haro expérimenta le dispositif qui avait été conçu par le prince Romakoff (fig. 16).

Ce dispositif est constitué par deux ballons de même capacité, reliés l'un à l'autre par un tube métallique qui plonge jusqu'au fond de chacun d'eux, le tube peut osciller autour d'un axe horizontal passant par son milieu.

Le ballon situé à la partie inférieure qui doit être exposé au soleil, contient un liquide volatil (sulfure de carbone par exemple) alors que le reste de l'appareil est vide. Quand le ballon inférieur s'échauffe, le liquide s'évapore et va se condenser dans le ballon supérieur qui se trouve à l'abri du so-

leil. Lorsque ce dernier ballon acquiert un poids supérieur à l'autre, le système bascule et le phénomène recommence.

Les expériences furent faits à Nice avec les caractéristiques suivantes : ballon en cuivre de diamètre 20 cm. et tube en laiton : le système basculait toutes les 2 min. en élevant 1 kg. d'eau à 25 cm. de hauteur, en sorte que le travail accompli était de 0,25 kgm.

Le docteur Haro pensait que le travail pourrait être augmenté en remplaçant les ballons par des cylindres en laiton.

Recherches de Pifre.

Pifre, collaborateur de Mouchot, ayant remarqué que les rayons réfléchis par le réflecteur de Mouchot chaufferaient beaucoup plus à la partie inférieure de la chaudière, qu'à la partie supérieure, adopta un réflecteur se rapprochant d'un paraboloïde de révolution. Ce réflecteur était constitué par trois troncs de cône se raccordant suivant une parallèle et dont les génératrices faisaient un angle de moins en moins ouvert en allant du bas vers le haut (45° pour le tronc de cône médian). Les rayons solaires étaient ainsi concentrés sur une longueur bien moindre, ce qui permit à Pifre de réduire de moitié la hauteur de la chaudière et par suite la perte de chaleur par rayonnement. Avec un réflecteur présentant une ouverture de 9 m² 25, une chaudière de 50 l., l'ébullition de l'eau par temps clair se produit en 40 min. et la vapeur produite dont la tension augmentait de 1 kg. toutes les 7 min. permit de faire fonctionner une machine à vapeur. Au cours d'autres essais effectués en France et en Egypte, Pifre s'occupa avec succès du problème de l'élévation de l'eau.

Recherches de Crova.

En 1881, Crova avec Duponchel et Fulcrand effectua des essais de rendement sur l'appareil de Mouchot, en mesurant la quantité de chaleur reçue au moyen d'un actinomètre, et la quantité de vapeur produite. Le tableau XI fournit en calorie kg. les quantités de chaleur moyennes reçues et utilisées « Q » et « Q' » par mètre carré par heure ainsi que le rendement « R » ; il donne également les maximum de ces grandeurs.

TABLEAU XI

Q (moyenne) : 616 cal. Q' moy. : 258 cal. R moy. : 0,491
Q (max.) 25 avril 945 cal. Q' max. (15 juin) 547,5
R max. (14 juin) 0,852

Crova remarque que le rendement n'est pas proportionnel à l'intensité de la radiation solaire et ne varie presque jamais avec elle ; il dépend de la température ambiante. Il conclut de ses expériences que, dans les climats tempérés, la durée d'insolation n'est pas suffisamment régulière pour permettre une utilisation pratique de la chaleur solaire, mais que dans les pays chauds, le problème se pose d'une façon différente.

Autres recherches sur la question.

J. Ericson utilise un réflecteur constitué par un énorme miroir parabolique ayant une ouverture de 65 m², en combinaison avec un système de tubes chargés d'eau sous pression exposés aux rayons réfléchis. La vapeur alimente directement la machine motrice. Malgré le bon rendement obtenu, l'auteur, après 20 ans d'essais, est arrivé à cette conclusion que l'énergie solaire revient à un prix plus élevé que l'énergie thermique.

W. Adams, le seul Anglais qui ait travaillé la question, après divers essais effectués aux Indes, conclut que les miroirs métalliques donnent un meilleur rendement que ceux en verre. Dans son appareil, un miroir conique constitué par un grand nombre de miroirs plans disposés d'une façon convenable, concentre le rayonnement solaire sur une chaudière en cuivre contenant 49,9 litres d'eau. L'ébullition se produit en 20 min. et la quantité de vapeur obtenue est de 6 litres par h. environ. D'autres essais furent également conduits avec une chaudière en cuivre analogue à celle utilisée par Mouchot. Après une heure environ de chauffage, la tension de vapeur atteignait 7 atmosphères (fig. 17).

Tellier, en 1889, est le premier qui utilisa la chaudière tubulaire en tôle ; celle-ci était remplie d'une solution d'ammoniacale qui, sous l'effet de la chaleur solaire, dégage le gaz ammoniac avec une pression de plusieurs atmosphères. D'après les expériences de cet auteur, les vitres transparentes donnent un meilleur rendement que les vitres colorées.

A. Encas fit de 1901 à 1904, des expériences avec un appareil dont la chaudière était formée de deux tubes d'acier concentriques ; le réflecteur avait 65 m^2 d'ouverture, il était parabolique. La longueur des tubes était de 3 m. et la capacité de la chaudière de 50 l. D'après l'auteur, la quantité de chaleur utilisable sous le climat où il opérait (Arizona), était de 1.06 cal. par cm^2 et par min., ce qui constituait un excellent rendement (75 % environ). La pression de vapeur atteignait fréquemment et même dépassait 11 kg. cm^2 et la quantité d'eau vaporisée 50 kg. par heure.

Frank Schumann commença ses travaux en 1906 avec un appareil de 3,5 cv et 108 m^2 de surface d'insolation. Le bouilleur était constitué par un châssis vitré renfermant de l'eau dans laquelle immergeaient des tubes noircis remplis d'éther dont la vapeur faisait fonctionner une machine monocylindrique verticale à simple effet et à condenseur.

En 1910, il construisit une unité d'expérience à bouilleur lamellaire Tellier ; le châssis était à double vitrage de $163 \times 63 \text{ cm.}$ et de 6 cm. de profondeur ; il était incliné de telle façon que les rayons y tombent normalement à midi ; malgré l'absence de réflecteur, avec cet appareil, Schumann enregistrait des températures dépassant 136° .

Poursuivant ses essais, il installa en 1911 un appareil à Tacony (Philadelphie) identique au précédent, mais muni de deux réflecteurs plans ; le degré de concentration (rapport entre la surface d'insolation totale et la surface de la chaudière seule) était de 2 à 1. La surface d'insolation mesurait environ 930 m^2 et la chaudière produisait 370 kg. de vapeur sous une pression de $1/2 \text{ (kg. cm}^2\text{)}$. Le travail que la machine pouvait fournir était donc de 1 cv. pour 22 m^2 de surface d'insolation.

Ce dispositif a été perfectionné par C. Boys, Ackermann et Walrow en plaçant le bouilleur près du bord d'un réflecteur parabolique de façon à obtenir une meilleure concentration des radiations. C'est avec de tels appareils qu'a été réalisée l'installation de Meadi (près du Caire) (fig. 18). Cette installation comportait cinq bouilleurs parallèles sur lesquels l'énergie solaire était concentrée par des miroirs en forme de cylindres paraboliques horizontaux de 4 m. d'ouverture et de 62,5 m. de longueur orientés du N. au S. Les réflecteurs étaient

d'ailleurs orientables et suivaient le mouvement diurne du soleil ; ils avaient été disposés à 7 m. les uns des autres de façon à éviter les ombres mutuelles.

Les essais qui eurent lieu en 1912 ne donnèrent pas les résultats escomptés par suite d'un accident survenu au bouilleur pendant le transport ; l'installation produisit néanmoins 500 kg. de vapeur à l'heure sous une pression de 1,5 kg. cm². Le moteur à basse pression et condenseur développait 50 cv h ; sa consommation était donc de 10 kg. de vapeur par CV.

Schumann a également monté à Philadelphie une installation qui comportait 26 éléments disposés par rangs de deux et ayant une surface totale de chauffe de 478 m² ; cette installation permettait d'élever 11 m³ d'eau par min. à la hauteur de 10 m., ce qui représente une puissance de 25 CV.

Expérience d'Abbot.

Abbot, qui a fait tant de travaux remarquables sur le soleil, s'est également attaqué au problème de l'utilisation de l'énergie solaire. En 1936 il exposa au congrès international des forces motrices à Washington un moteur solaire de 1/2 CV (voir fig. 12) comprenant trois bouilleurs identiques reliés entre eux et disposés parallèlement suivant un plan incliné de façon à recevoir le plus d'énergie possible.

En 1938 il mit au point un appareil de 1/2 CV muni d'un bouilleur unique et d'un miroir sphérique.

Dans un autre dispositif construit en 1939, le bouilleur est composé de deux tubes concentriques entre lesquels on a fait le vide. Il constitue ainsi une sorte de bouteille thermos qui n'est ouverte qu'à sa partie supérieure. L'eau pénètre en haut et passe à travers la vapeur par un tube d'alimentation pour atteindre la base du bouilleur. L'appareil était muni d'un dispositif de réglage de l'eau d'alimentation suivant la tension de la vapeur produite ; en somme la vapeur se trouvait dans le tiers supérieur du bouilleur. Le réglage de la position du miroir était réalisé par un moteur à courant continu (fig. 19).

La température atteignait 190°, ce qui correspond à une tension de 13 kg. cm². Le tableau XII donne les rendements de chacune des parties de l'installation de cet appareil.

TABLEAU XII

Bouilleur	R = 82 %
Miroir	R = 85 %
Transmission du tube thermos	R = 95 %
Perte de rayonnement	R = 10 %

Le rendement total avait pour valeur :

$$R_{\text{tot}} = 0,82 \times 0,85 \times 0,95 \times 0,90 = 0,60$$

Calculons le rendement R_{car} de Carnot ; la température du condenseur était 30°, nous obtenons :

$$R_{\text{car}} = \frac{190 - 30}{190 + 273} = 34,15 \%$$

ce qui fournit pour expression du rendement total appliqué à l'ensemble de l'installation, et compte tenu du rendement du moteur actionné par la vapeur : de 75 %

$$R_{\text{tot}} = 0,60 \times 0,34 \times 0,75 = 0,15$$

CHAPITRE VIII

PROJET D'INSTALLATION DE POMPAGE PAR LA CHALEUR SOLAIRE DANS LA STEPPE EGYPTIENNE

Le Sahara est une immense étendue de terre sablonneuse limitée par l'équateur au sud, la Méditerranée au nord, l'océan Indien et la mer Rouge à l'est. Les fleuves qui le traversent (Nil, Niger, Sénégal) n'ont pu transformer qu'une faible partie de ce territoire en terre cultivable. Les vallées fluviales sont en effet très encaissées, ce qui rend l'irrigation particulièrement difficile. La culture ne peut être entretenue que par les pluies qui tombent d'une façon irrégulière et dans certaines régions en quantité insignifiante. S'il n'en était pas ainsi, si la terre était suffisamment humide, le Sahara deviendrait au moins sur une grande étendue, d'une fertilité comparable à celle des oasis qui, çà et là, parsèment ce territoire de leurs riches plantations.

Du point de vue du régime des pluies, on peut diviser le Sahara en trois régions bien distinctes :

1° *Le Tel*, où les chutes de pluie atteignent 400 mm. d'eau par an. Cette région est cultivable ; il y pousse des arbres à feuilles persistantes (olivier, chêne, oranger) ; la culture des céréales est même possible, des tribus sédentaires l'habitent, et la vie s'y poursuit comme au voisinage des rivières.

2° *La Steppe*, où il ne tombe guère que 200 mm. d'eau par an ; la végétation se réduit à des graminées et des plantes épineuses comme l'alfa et le chih (armoïse). Les habitants y sont

de pseudo-nomades et changent de résidence de temps en temps, à la recherche des herbages, mais ces migrations n'ont lieu que dans un espace délimité et à des époques bien déterminées.

3° *Le désert*, où, par suite de l'insuffisance des pluies (moins de 100 mm. par an), le sol stérile, les rares plantes qui peuvent y végéter présentent des racines qui vont chercher l'humidité au plus profond du sol ; ces plantes à floraison très rapide, se dessèchent mais ne meurent pas en général, grâce à la longueur de leurs racines qui atteignent parfois 4 mètres de longueur.

Cette région constitue le désert proprement dit où la vie n'est guère possible.

Le problème à résoudre est donc de trouver l'eau en quantité suffisante pour irriguer le désert ou tout au moins la steppe, de façon à pouvoir y établir des cultures durables. Or, l'eau souterraine étant assez abondante dans le désert, on peut penser élever cette eau jusqu'au niveau du sol ; on peut, par exemple, se proposer de cultiver toutes les terres qui se trouvent à 15 mètres d'altitude ; le résultat de ce projet restreint constituerait un progrès capital. Mais il faudrait mettre en jeu une force motrice considérable pour élever les énormes quantités d'eau destinées à l'irrigation, et dans la mesure du possible cette force motrice devrait être trouvée sur place. Or, le vent ne souffle dans le désert que 50 jours par an ; l'énergie qu'on pourrait ainsi récupérer serait donc intermittente et d'ailleurs tout à fait insuffisante. D'autre part, il n'existe pas de gisement de charbon connu au Sahara, et il ne faut guère songer à amener du charbon des pays producteurs, en raison du prix élevé du transport dans des régions d'accès difficile ; à titre d'exemple, le charbon coûte 6 fois plus cher au Caire qu'à Londres ; bien entendu, ce prix monterait à mesure qu'on s'enfonce plus avant dans le désert.

L'énergie hydraulique du Nil, du Niger ou du Sénégal demanderait, pour être exploitée, une mise de fonds considérable. On sait que le gouvernement égyptien, lorsqu'il a examiné le projet d'exploitation de l'énergie hydraulique du Nil, se rendit compte que cette énergie était déjà tout juste suffisante pour combler les besoins domestiques de la vallée proprement dite de ce fleuve.

Il n'existe pas dans le Sahara non plus de pétrole exploité à part le faible gisement des environs de Suez, et l'importation de ce produit obéit aux mêmes conditions restrictives que le charbon.

En définitive, la seule source d'énergie qui puisse être exploitée de façon rationnelle et peu coûteuse est l'énergie solaire.

Nous ne pensons pas qu'il faille construire des centrales électriques mues par la chaleur solaire, et qui actionneraient les stations de pompage ; il nous paraît plus indiqué de mettre entre les mains des habitants de ces contrées peu instruits et pauvres, en général, des appareils adaptés à leurs moyens et qui ne nécessitent aucun soin particulier. C'est ce point de vue qui nous a guidé dans l'établissement de notre projet qui sera relatif à la construction d'un appareil de faibles dimensions et d'un prix de revient peu élevé.

Toute installation de transformation d'énergie solaire en énergie mécanique comporte nécessairement :

1° Un appareil susceptible de capter les radiations solaires.

2° Un bouilleur.

3° Une machine motrice alimentée par la vapeur émise par le bouilleur.

On pourrait songer à utiliser de grosses lentilles qui concentreraient l'énergie solaire à leur foyer. Ces lentilles présentent des aberrations, mais ce ne serait pas là une condition restrictive, puisque la chaudière ne se réduit pas à un point mais les lentilles coûtent fort cher, s'altèrent facilement sous l'influence des agents atmosphériques ; en outre, elles absorbent une fraction importante de l'énergie incidente.

Les miroirs plans présentent eux aussi un grave inconvénient : leur orientation doit être légèrement modifiée au cours d'une même journée si l'on veut maintenir le flux d'énergie envoyé sur la chaudière.

Les miroirs sphériques présentent les mêmes inconvénients que les miroirs plans. Seuls les miroirs paraboliques qui, comme il a été indiqué au précédent chapitre, ont été utilisés par de nombreux auteurs, paraissent répondre au but que

nous nous sommes proposé ; en les disposant d'est en ouest on n'a plus besoin de modifier leur orientation que toutes les deux ou trois semaines.

Les miroirs peuvent être construits soit en verre soit en métal de pouvoir réflecteur élevé.

Les miroirs en verre sont lourds, fragiles et leurs garnitures se détériorent assez rapidement, ainsi ne nous semblent-ils pas adaptés aux usages rustiques que nous avons en vue, et leur préférons-nous les miroirs métalliques qui peuvent être construits en tôle recouverte d'une couche électrolytique réfléchissante. Dans le premier cas, la couche réfléchissante n'est jamais assez adhérente pour résister aux agents atmosphériques, elle s'altère rapidement et doit être renouvelée à bref délai. Dans le second cas, les miroirs peuvent être construits en aluminium; étain, cuivre ou en acier inoxydable.

L'aluminium, qui possède un pouvoir réflecteur de 77 % lorsqu'il est bien poli, est facilement altérable et nécessite un polissage fréquent ; le cuivre et l'étain se ternissent très rapidement sous l'influence des agents atmosphériques et il ne faut pas songer à assurer l'entretien de leur poli.

C'est l'acier inoxydable à 18 % de nickel et 10 % de chrome qui paraît le mieux s'adapter aux exigences climatiques du Sahara ; en effet il est pratiquement inaltérable et il est susceptible d'un beau poli en raison de la finesse de son grain. De plus, il possède un pouvoir réflecteur supérieur à 80% ; en raison de sa dureté, il peut être employé en tôle très mince d'un transport facile et peu coûteux et à laquelle il est assez facile de donner la forme parabolique.

2° *Bouilleur*. — C'est l'appareil qui, recevant l'énergie solaire, la transmet au liquide qu'il renferme. On peut envisager deux formes de bouilleurs : soit le bouilleur à fluide intermédiaire, soit le bouilleur à fluide moteur.

A. *Bouilleur à fluide intermédiaire*. — Dans ce cas le fluide contenu dans le bouilleur transmet l'énergie qu'il reçoit du soleil à un second fluide destiné à l'alimentation du moteur ; le fluide intermédiaire doit avoir un point d'ébullition plus élevé que celui du fluide moteur, et ne subir aucune altération au cours du circuit qu'il parcourt

sans cesse entre le bouilleur et l'échangeur qui renferme le second fluide. L'échangeur sera donc à contre-courant comme tous les échangeurs thermiques.

B. Bouilleur à fluide moteur. — Le principal intérêt de ces sortes de bouilleurs est de supprimer l'échangeur qui, ayant son rendement propre, a toujours pour effet de réduire le rendement global de l'installation.

C. Formes à adopter. — On sait que les chaudières cylindriques présentent en cas d'explosion, de très graves dangers en raison de l'énorme quantité d'énergie qu'elles peuvent emmagasiner, aussi leur préfère-t-on habituellement les chaudières tubulaires; mais ces chaudières étant à feu externe leur calorifugeage pose des problèmes complexes. Il nous paraît indiscutable que le dispositif adopté par Abbot en 1936 (chaudière unitubulaire calorifugée par une enveloppe où l'on fait le vide) constitue pour l'instant la meilleure solution de ce délicat problème. Le schéma de la figure 20 représente la forme de chaudière qui paraît la mieux adaptée au but que nous poursuivons. L'eau pénètre par le tuyau A jusqu'aux $2/3$ du tuyau B formant le bouilleur, s'échauffe, la vapeur produite se dégage par C. On pouvait régler la quantité d'eau à introduire à l'aide d'un dispositif agissant en fonction de la température (dispositif d'Abbot) ou en fonction de la tension de la vapeur, cette dernière façon de procéder nous semble plus rationnelle.

Pour obtenir une bonne absorption de l'appareil, le tuyau intérieur sera badigeonné de peinture à base de noir de fumée; le tuyau extérieur sera en verre Pyrex transparent, et pour calorifuger la chaudière nous ferons comme Abbot le vide dans l'espace compris entre les deux tubes.

3° Moteur. — Les premiers essais connus, nous l'avons signalé, ont été réalisés soit sur des moteurs simples soit sur des moteurs à liquide volatil (l'anhydride carbonique ou l'ammoniaque). Nous avons déjà indiqué que nous n'étions pas partisans de ce dernier modèle qui complique l'installation et nécessite l'emploi d'échangeurs de chaleur, notre choix s'est donc arrêté sur un moteur simple. Une machine à vapeur à moyenne ou à basse pression; la première exigera une grande surface d'insolation, c'est-à-dire

des miroirs à grande surface et en nombre suffisant ; il nous semble plus indiqué d'adopter provisoirement les machines à basse pression ; dans ce cas, on peut ou bien évaporer l'eau à une pression égale ou supérieure à la pression atmosphérique, ou bien même l'évaporer à une pression inférieure dans un auto-évaporateur, par exemple celui du Docteur Lajau-nie. Mais les auto-évaporateurs comportent un matériel délicat et complexe qui ne peut guère être mis en œuvre que par des spécialistes.

Aussi, poursuivant toujours notre but qui est de chercher à réaliser une installation simple et peu coûteuse, avons-nous basé notre projet sur l'emploi d'un injecteur.

Injecteur. — Un injecteur se compose essentiellement d'un tuyau qui amène la vapeur de la chaudière, ce tuyau est terminé par une tuyère conique dont l'extrémité débouche à l'intérieur d'un espace annulaire appelé cheminée où l'eau froide est aspirée. Dans le prolongement de la tuyère, le fond de la cheminée se continue par un ajutage conique dans l'axe duquel à 1 centimètre environ de son extrémité, se trouve un autre ajutage allongé et divergent communiquant par un tuyau d'alimentation avec la chaudière. Un bouchon conique appelé « aiguille » peut à l'aide d'une tige à longs filets, régler le débit de la vapeur dans la tuyère.

La vapeur injectée par la tuyère produit une aspiration par entraînement qui amène l'eau froide dans la cheminée ; à son contact la vapeur se condense partiellement et l'aspiration devient plus énergique, l'eau est refoulée à la hauteur voulue.

Comme les circonstances ne nous ont pas permis de réaliser les expériences propres à l'étude de la marche de cet appareil à basse pression, nous nous bornerons à en faire l'étude d'après la courbe qui nous a été donnée par les établissements Horstmann, à Paris (fig. 21) ; cette courbe montre qu'à la pression de 1,6 atmosphère, 1 kilogramme de vapeur aspire environ 3.000 kilogrammes d'eau qu'il fait monter de 0 m. 6 et refoule à environ 16 m.

Calculons le travail fourni par l'injecteur et celui théoriquement fourni par 1 kg de vapeur :

Une pression de vapeur $p = 1,6$ atm. correspond à une température t donnée par la formule approximative :

$$p = \left(\frac{t}{100} \right)^4$$

d'où l'on tire : $t = 112$.

La quantité de chaleur reçue par 1 kg de vapeur est, d'après Regnault, égale à :

$$606,5 + 0,305 (t - \Theta)$$

pour $t = 112^\circ$ et $\Theta = 25^\circ$ on obtient ainsi environ 630 cal. kg.

Le travail théorique de la vapeur T est donc :

$$T = 630 \times 426 = 260.000 \text{ kgm. environ.}$$

D'autre part, le travail fourni par l'injecteur est T' (1 kg. de vapeur) :

$$T' = 3.000 (16 + 0,60) = 50.000 \text{ kgm.}$$

La valeur du rendement est donc :

$$R = \frac{T'}{T} = \frac{50.000}{260.000} = 19 \%$$

Supposons maintenant que le rendement d'une turbine soit égal à 25 %, que le rendement mécanique des transmissions soit de 0,50, et que la turbine actionne une pompe centrifuge ayant un rendement de 90 %, le rendement global de cette installation (rapport entre le travail fourni par la pompe et l'énergie calorifique consommée par la turbine) serait donc :

$$0,25 \times 0,50 \times 0,90 = 11 \%$$

rendement inférieur à celui des injecteurs. D'où un réel avantage en faveur de ceux-ci; toutefois, l'installation des injecteurs comporte aussi quelques inconvénients : étant donné qu'un injecteur travaille plus facilement au refoulement qu'à l'aspiration, il doit être horizontal ; il faudrait donc creuser un puits pour l'installation auprès de l'eau à aspirer et cet inconvénient n'existe pas dans le cas d'un groupe turbine-pompe, mais cet inconvénient ne doit pas être considéré

comme bien sérieux, vu le bas prix de la main-d'œuvre dans ces pays. L'injecteur présente d'ailleurs une autre supériorité sur la pompe centrifuge. Il aspire même à sec, tandis que la pompe se désamorce dès qu'il se trouve de l'air dans le tuyau d'aspiration ; on peut, il est vrai, obvier à cet inconvénient par le dispositif bien connu d'immersion des palettes de la pompe centrifuge. Enfin, un groupe turbo-pompe demande beaucoup plus de graissage qu'un éjecteur, et on sait que le problème de la lubrification est particulièrement complexe dans les pays chauds, en raison de la haute température ambiante. Ces difficultés s'amplifient dans le désert par suite de la présence constante de poussières sablonneuses, très fines, qui pénètrent dans les machines, se mélangent aux lubrifiants. Toutes les solutions qui ont pu être envisagées pour augmenter l'étanchéité des moteurs qui assuraient la marche des dragueurs du canal Maymoudieh (confins du désert de Lybie-Egypte) se sont révélées vaines. Cette poussière a été la cause de plusieurs accidents malgré toutes les précautions prises, notamment l'emploi d'étoffes très serrées constamment imbibées d'eau et qui fermaient les ouvertures des salles des machines. A ce point de vue encore, et ceci a une grande importance dans le désert, un injecteur paraît nettement supérieur à un groupe turbo-pompe, car il serait disposé dans le sous-sol à l'abri du vent.

D'après les renseignements que nous ont si aimablement fourni les Etablissements Horstmann, l'injecteur que nous venons d'étudier présente les caractéristiques suivantes : il peut aspirer 13.600 kg. d'eau par heure, soit 108.800 kg. par journée de 8 heures, ce qui fait près de 40.000 m³ d'eau par an. Dans nos calculs, nous nous sommes borné à évaluer la surface que pourrait irriguer un tel injecteur, en supposant que cette surface appartienne à la steppe désertique et qu'on veuille la rendre aussi irriguée que les régions du Tel (400 mm. d'eau par an). Dans ces conditions, 1 hectare de terre devrait recevoir en une année une quantité d'eau égale à : $0,4 \times 10.000 = 4.000 \text{ m}^3$.

Or, nous avons vu qu'un injecteur pouvait élever 40.000 m³ d'eau par an. Nous en concluons qu'une installation d'un injecteur peut faire revivre environ 10 hectares de terres désertiques.

Calculons la surface d'insolation qui serait nécessaire pour assurer la marche de cet injecteur : comme 1 kg. de vapeur est susceptible d'élever 3.000 kg. d'eau à 16 m. de hauteur, les 108.800 kg. d'eau que l'injecteur fournit par journée correspondent à :

$$\frac{108.800}{3.000} = 36 \text{ kg. de vapeur,}$$

c'est-à-dire une quantité de vapeur de 40 kilos.

Par suite, la quantité de chaleur que doit recevoir l'insolateur est :

$$40 \times 630 = 25.200 \text{ cal. kg.}$$

La surface d'insolation doit donc être, en supposant qu'elle reçoive $0.3.10^4$ cal. kg. m²/jour :

$$\frac{25.200}{3.000} = 8,4 \text{ m}^2.$$

soit environ 10 m².

Calculons maintenant le prix de revient d'une installation susceptible d'irriguer 10 hectares :

Deux injecteurs n° 10,5	950 fr.
20 m ² de tôle en acier inoxydable, poids 0,168. 10×30×8 : 144 kg., soit 150 kg. à 30 fr. le kilo- gramme	4.325 fr.
Polissage à 40 fr. le mètre carré	1.200 fr.
Puits de 17 mètres de profondeur et 4 m ² de sur- face 70 m ² à 10 fr. le mètre cube	700 fr.
Transport du matériel	300 fr.
Main-d'œuvre : 10 jours 5 manœuvres à 20 francs par jour	1.000 fr.
40 mètres de tuyauterie pour amener la vapeur aux injecteurs à 50 francs par mètre	2.000 fr.
Calorifugeage	2.000 fr.
Frais divers	4.000 fr.
	17.475 fr.

soit 20.000 francs.

Remarquons que le prix d'amortissement sera très faible ; pratiquement, seuls les miroirs s'altèrent et leur polissage ne reviendrait guère qu'à 1.200 fr. par an, soit 12 fr. environ par hectare par an, or on compte 400 fr. par hectare et par an. En réalité on peut considérer que le prix de première installation est un prix d'achat de la terre, soit qu'on achèterait un hectare à la somme modique de 2.000 francs.

Conclusion

De l'étude qui précède, nous pouvons conclure qu'une installation solaire dotée d'injecteurs paraît praticable dans le Sahara, étant donné la grande quantité d'énergie solaire dont on peut disposer à peu près régulièrement et à faible prix de revient et d'entretien.

On diminuerait ainsi les frais élevés de transport de combustible, que doivent subir les installations thermiques situées dans les régions mal desservies.

Nous pensons pouvoir réaliser pratiquement notre projet en Egypte, dès la fin de la guerre. Et si, comme nous l'espérons, nos essais sont couronnés de succès, amplifier l'installation unitaire que nous avons décrite et dont nous avons calculé les prix de revient et d'entretien.

CHAPITRE IX

RESUME ET CONCLUSION

Nous basant sur les expériences déjà réalisées en vue de l'utilisation de l'énergie solaire et plus spécialement sur celles qui se rapportent à la conversion de cette énergie en énergie mécanique, nous nous sommes proposé, dans ce travail, de mettre au point un avant-projet d'installation qui serait susceptible, pensons-nous, d'assurer avec des moyens locaux, l'irrigation du désert africain, dans les territoires qui ne sont pas trop éloignés du Nil.

Ce fleuve coule au milieu de terrains sablonneux à travers lesquels une assez grande partie de l'eau se perd en donnant naissance à de véritables rivières souterraines. A ce propos, il est curieux de constater, en examinant une carte d'Egypte, que les oasis du désert occidental (désert de Libye) sont une ligne droite presque parallèle au cours du fleuve lui-même. Si l'on prolonge cette ligne vers le sud, elle semble aller à la rencontre du Nil au voisinage de la grande circonvolution qu'il dessine avant son entrée en Egypte ; il se termine aux oasis de Siwa (Amon). Evidemment, il est difficile de dire avec certitude qu'il existe vraiment une rivière souterraine dont le tracé continu suit la ligne indiquée ; il est plutôt vraisemblable que les eaux qui s'échappent de la vallée du fleuve constituent un réseau de rivières souterraines qui n'ont pas forcément des liens entre elles. Puiser l'eau dans ces rivières à l'aide de pompes mues grâce à l'utilisation de la chaleur solaire et grâce à cette eau assurer la possibilité de développement des cultures et de la vie animale, tel

est le projet, peut-être un peu hasardeux, que nous avons essayé d'envisager.

Avant d'étudier les moyens propres à utiliser le rayonnement solaire, il nous a paru intéressant d'examiner les méthodes de mesures de son intensité et les modifications que subit celle-ci sous l'influence de divers facteurs. Nous avons été amené à passer en revue quelques-uns des dispositifs qui servent à la mesure de cette intensité, notamment les appareils d'Angström et d'Abbot. Nous avons montré que ces appareils répondent en général à deux types principaux : un type qui comporte une sorte de calorimètre qui, recevant les rayons solaires, permet d'évaluer l'élévation de température qu'il subit en un type utilisant les phénomènes thermo-électriques par la méthode de compensation, dans lequel un courant d'intensité connue, lancé dans le circuit d'une lame abritée des rayons solaires, compense celui qui résulte de l'échauffement d'une lame identique à la précédente exposée au rayonnement.

La durée d'insolation nous fournit une indication du temps pendant lequel le soleil brille et par suite, la durée éventuelle de fonctionnement de toute machine solaire a été également envisagée. Nous avons brièvement décrit les appareils qui sont utilisés à la mesure de cette durée.

Nous avons indiqué la valeur actuellement admise de l'intensité du rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère, valeur à peu près constante et égale à 1,932 cal. g. par cm^2 et par minute. Nous avons fait remarquer que les expériences et calculs effectués en vue de la détermination de cette intensité ont parfois conduit à des résultats qui diffèrent assez notablement de la valeur admise. Mais il semble bien, d'après Abbot, que ces écarts sont imputables à des erreurs d'expériences et que l'on a quelques raisons de désigner sous le nom de « constante solaire », l'intensité du rayonnement solaire aux confins de l'atmosphère.

Dans la deuxième partie de notre travail, nous avons relaté les diverses tentatives faites en vue de transformer l'énergie solaire en énergie thermique susceptible d'être utilisée à la production d'eau distillée et à divers usages domestiques effectuées par Ch. Maurain, J. Richard, Mouchot, Ginestous, Gè Harding et C. Abbot, qui ont réussi à mettre sur pied des installations d'eau distillée dans des conditions intéressantes.

Il ressort de ces essais que l'appareil rustique de Harding constitué par de simples châssis vitrés et utilisé notamment à Salins (Chili) fournit un bon rendement. Une autre installation plus perfectionnée réalisée par C. Abbot a fourni jusqu'à 7.000 gr. d'eau distillée par jour et par mètre carré. Malheureusement, les appareils utilisés sont d'un fonctionnement assez délicat et d'un prix de revient élevé.

Quant aux appareils destinés aux usages domestiques ou au chauffage, nous avons montré qu'ils appartiennent à deux types principaux : ceux à fluide moteur dans lesquels le fluide utilisé est chauffé directement par le soleil, et ceux à fluide intermédiaire dans lesquels on utilise un fluide auxiliaire chauffé directement par le soleil qui cède à l'eau la chaleur qu'il a accumulée ; ce fluide intermédiaire doit être inaltérable et avoir un point d'ébullition supérieur à la température que l'on veut atteindre. Le four de campagne et l'alambic de Mouchot, ainsi que les appareils d'Abbot ont particulièrement retenu notre attention.

La société « La Thermique Naturelle » a fait, en France, de nombreux essais qui ont démontré que l'installation de chauffe-eau, alimentée par l'énergie solaire, pouvait être envisagée dans de nombreux pays, et même dans des pays tempérés comme la France. D'après cette société, une surface d'insolation de $0,35 \times 0,85 \text{ m}^2$ et un réservoir de 50 à 70 l. suffiraient à une villa d'un étage avec salle de bains et buanderie.

Abbot, Aldrich et Fowle ont mis au point des appareils quasi automatiques qui se répandent de plus en plus en Californie.

La troisième partie de notre travail est consacrée à l'étude de la production de force motrice par l'énergie solaire. Nous avons surtout insisté sur les expériences de Mouchot qui, le premier, réussit à faire fonctionner un moteur à l'aide de la chaleur solaire ; l'installation qu'il avait réalisée comportait des réflecteurs destinés à concentrer la chaleur solaire sur une chaudière, la vapeur produite alimentait une sorte de machine qui fonctionna dans de bonnes conditions. Les installations ultérieures réalisées par d'autres expérimentateurs comportent toujours de puissants réflecteurs (en général des miroirs paraboliques), une chaudière renfermant un fluide approprié dont la vapeur alimente directement ou

indirectement un moteur. On compte habituellement qu'il faut une surface d'insolation de 15 à 20 m² par cv.

La dernière installation d'Abbot, à chaudière unitubulaire, a donné en 1939 un rendement global de 15 %.

Comme application, nous avons mis au point un projet d'irrigation de la steppe africaine et plus spécialement de la steppe égyptienne à l'aide de pompes mues indirectement par l'énergie solaire, pompes qui puisant l'eau dans les couches souterraines où se perd une partie des eaux du Nil, devraient être susceptibles de la répandre jusqu'à une altitude moyenne de 15 mètres.

Nous avons projeté une installation rustique d'un prix de revient peu élevé et aussi bien adaptée que possible aux conditions locales.

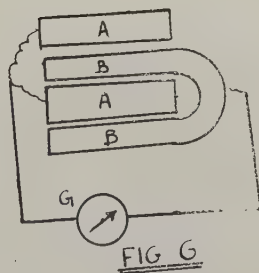
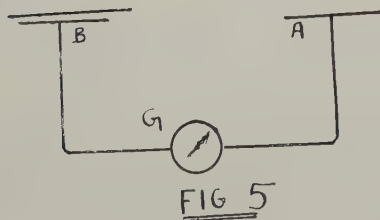
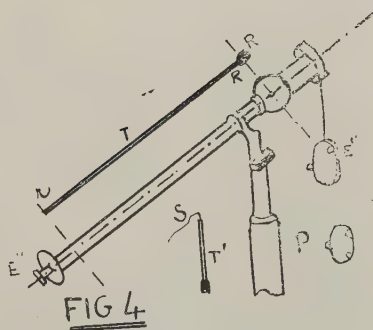
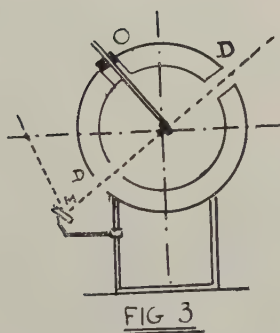
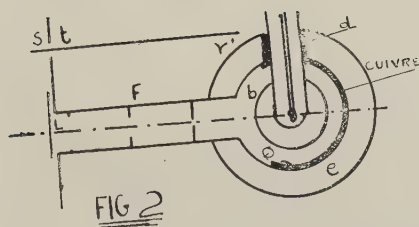
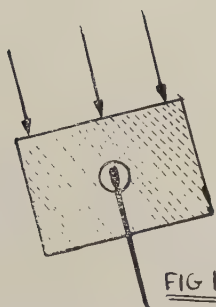
Cette installation comporte essentiellement un bouilleur unitubulaire calorifugé par une sorte de tube thermos analogue à celui utilisé par Abbot, et un réflecteur constitué par un ou plusieurs miroirs paraboliques en acier inoxydable (18 % Ni et 10 % Cr). Mais l'originalité de notre projet réside surtout dans l'emploi d'un injecteur à la place d'un turbo-pompe. L'injecteur coûte bon marché par rapport à un moteur quelconque et simplifie l'installation, puisqu'aucune pompe élévatoire n'est plus nécessaire.

L'installation que nous avons prévue pourrait irriguer d'une façon rationnelle et continue dix hectares de terres environ, ce qui est un bon résultat, vu le faible prix de l'installation, celle-ci ne revenant qu'à 20.000 francs environ. Cette dépense, une fois faite, notre installation nous paraît susceptible de fonctionner à peu de frais. Il nous reste à mettre ce projet à exécution sur la terre aride de la steppe égyptienne. Nous pensons pouvoir le faire dans un proche avenir.

VU:
Le Président de Thèse
A. BOUTARIC.

VU et approuvé,
Le Doyen de la Faculté des Sciences,
Dijon, le 15 Décembre 1943
SIMON.

VU et permis d'imprimer,
Dijon, le 15 Décembre 1943
Le Recteur de l'Académie de Dijon,
FERRERE.



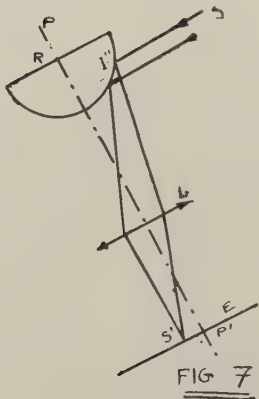


FIG 7

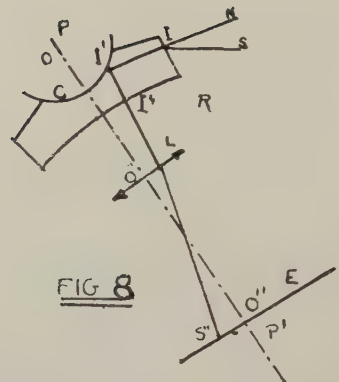


FIG 8

Fig. 10

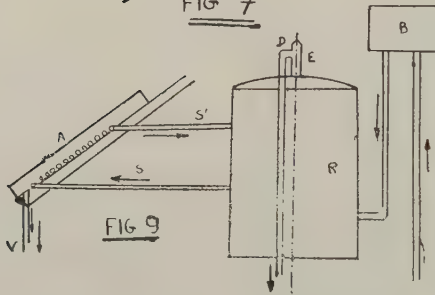


FIG 9

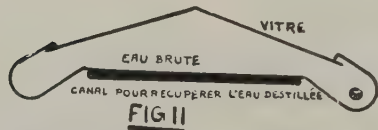


FIG 11

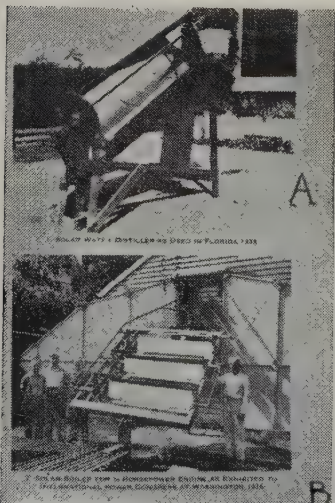


Fig. 12

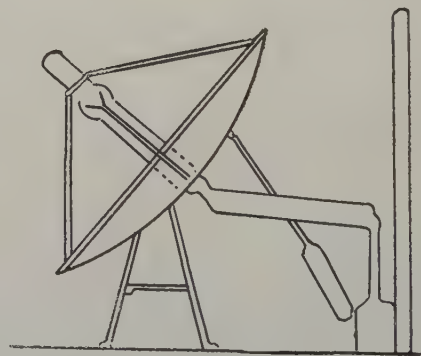


FIG 13

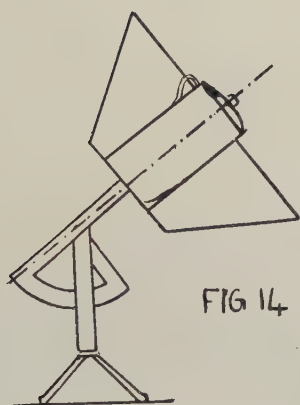


FIG 14

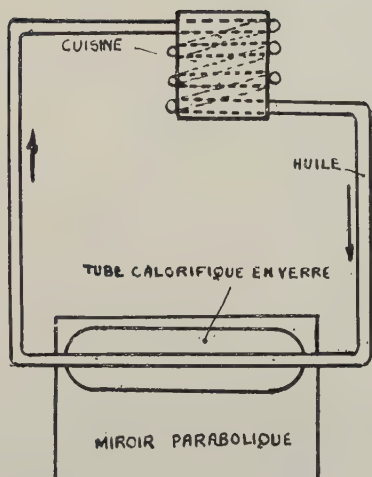


FIG 15

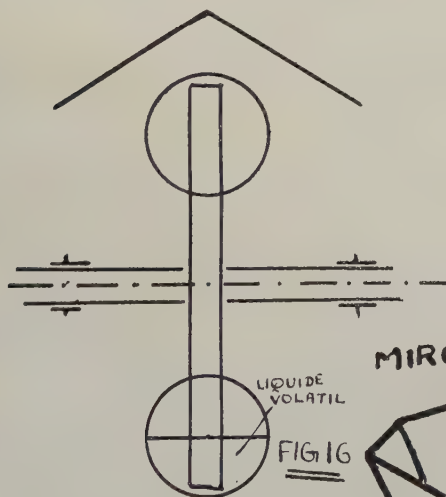


FIG 16

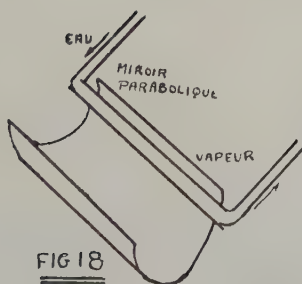


FIG 18

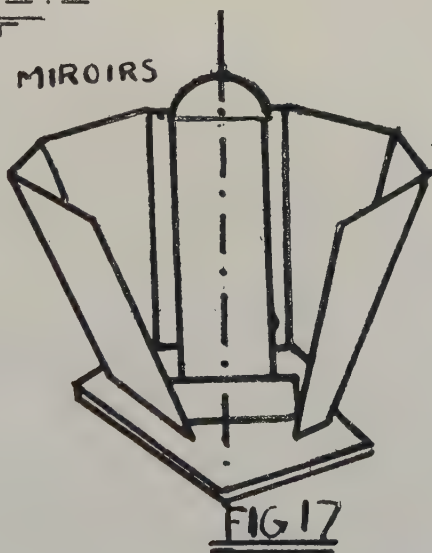


FIG 17

Fig. 19

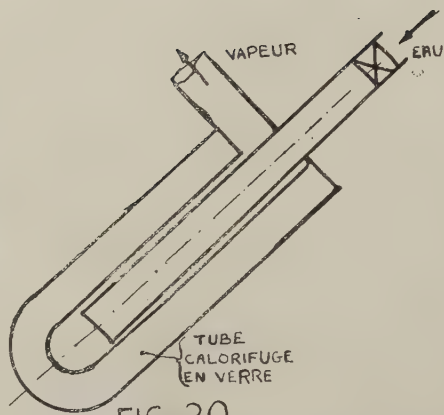
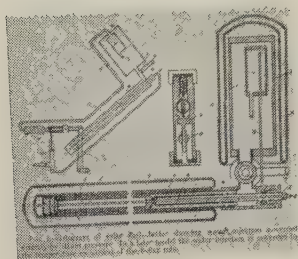
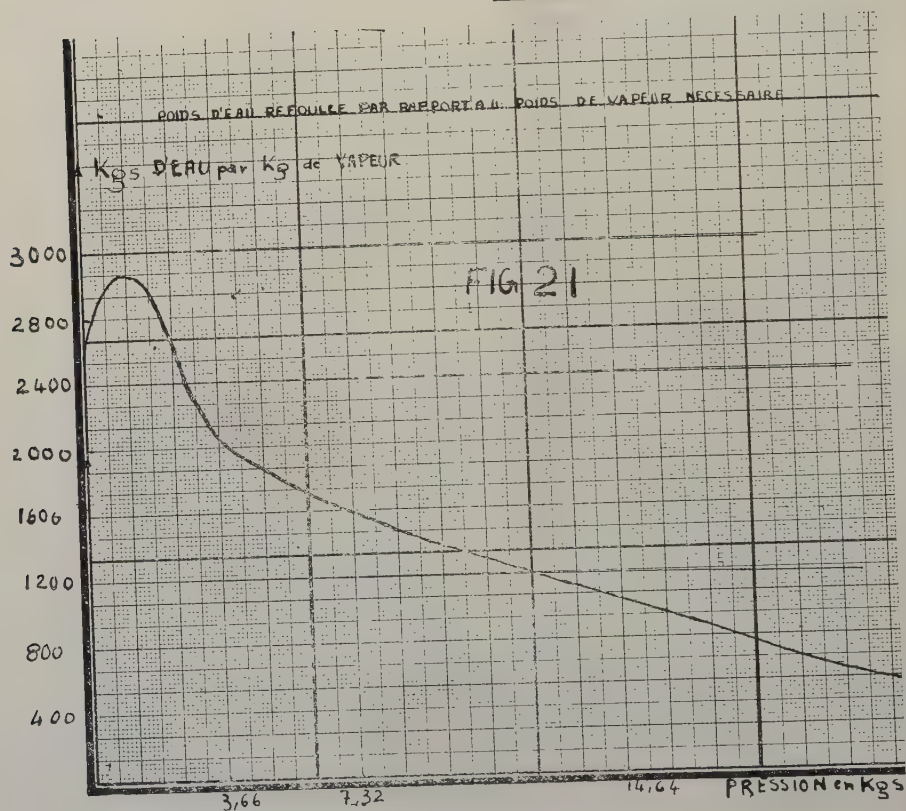


FIG 20



BIBLIOGRAPHIE

- GORCZINSKI. — *Génie Civil*, 17 janv. 1942, page 25, tome CXXIX.
- BOÛTARIC A. — *La nature*, n° 28199, 15 octobre 1929.
- KIMBALL et MARVIN. — *Journal of the Franklin Institute*, vol. 202, n° 3, sept. 1926, p. 273.
- A. BOUTARIC. — *Chaleur et Industrie*, 11^e année, n° 118, fév. 1930, p. 59.
- L. GORCZINSKI. — Tube pyrhéliométrique employé comme solarimètre. Imp. Cadore, à Bordeaux.
- *Revue d'Optique Théorique et Instrumentale*. T. II, 1932, p. 28.
- La Météorologie*, n° 30, Paris, 1927.
- Monthly Weather Review*, t. 54, Washington, 1926.
- Revue d'Optique Théorique et Expérimentale*. T. 3, Paris 1924.
- L. GORCZINSKI. — *Climat solaire de Nice et de la Côte-d'Azur*, Nice 1934.
- Annales du Service Botanique Tunisien*, n° 3, 1925, p. 39.
- Annales de la Société Météorologique de France*, vol. 56, 1908, p. 57.
- Physikalische Zeitschrift*, 9 Jahrg. N° 1, p. 18.
- Météorologische Zeitschrift*, vol. 25, 1908.
- L. GORCZYNSKI. — Sur les mesures de l'intensité du rayonnement solaire effectuées à Varsovie, et sur la théorie des appareils employés. *Thèse Montpellier* 1906.
- L. GORCZYNSKI et WIERZBICKA. — Comparaison entre l'actinomètre bimétallique de Michelson et le pyrhéliomètre électrique d'Angström. *C. R. Soc. des Sciences*, Varsovie 1915.
- C. ABBOT et FOWLE. — *Astrophysical Journal*, n° 33, 1911, p. 191.
- Ch. MAURAIN. — *Etude pratique du rayonnement solaire atmosphérique et terrestre*. Paris, Gauthier Villars 1937.
- C. ABBOT et ALDRICH. — *Smithsonian misc. Coll. vol. 92*, n° 13, publ. 3.288, 1934.
- Annals of the Astrophysical observatory of the Smithsonian Institution*, n° 2, 1908, p. 36.
- *Id.* n° 3, 1913, p. 37.
- K. ANGOTRÖM. — *Météorologische Zeitschrift*, n° 31, 1899, p. 633.
- BRAZIER. — *La Météorologie*, 1925, p. 9.
- G. TINGWALDT. — Ein neues Pyrheliometer für Absolutmessungen. *Zeitschrift für Instrumentenkunde*, 51 Jahrgang Heft n° 12, 1931, p. 593. R. Surings das Postdamer Pyrhéliometer für Absolutmessungen. *Meteorologische Zeitschrift*, 50, 1933, n° 7, p. 269.

- F. E. VOLOSHINE. — The new pyrheliometer. *Bulletin international de l'Académie des Sciences de Bohême*, 1929.
- Météorologische Zeitschrift, n° 25, 1908, p. 246.
- Anders Angström Veitrag zur Geographisk, n° 48, 1936, p. 303.
- Actinomètre à lecture directe et enregistreur. *Bulletin de l'ass. de Naturalistes de Nice et des Alpes-Maritimes*, n° 4, 1933, Nice. (L'Association Typographique.)
- H. KIMBALL et H. HOBBS. — *Journal of the society of America and review scientific instruments*, vol. 7, n° 9, sept. 1923, p. 707.
- C. R. 178, 1924, ip. 1.200.
- Revue d'optique théorique et instrumentale. n° 3, p. 473, 1934.
- F. LINKE. — *Beitrag zur Physik der freien Atmosphäre*, n° 19, 1932, p. 233.
- Quelques résultats d'étalonnage des tubes pyrhéliométriques des pyrhéliographes et des solarimètres. *Annales du Service Botanique Tunisien*, tome 5, 1928.
- Astrophysical Journal de l'Université d'Upsala, tome 9, 1899.
- ANGO. — *Traité de Météorologie*, 2^e édition, Paris, G. Villars, 1908, p. 11.
- K. ANGSTRÖM. — Détermination de la radiation solaire par la méthode de compensation électrique. *Monthly weather review*, 1901.
- CROVA. — Mesures de l'intensité de la radiation solaire. Paris, G. Villars, 1874.
- Mémoire de la section des sciences de l'Académie de Montpellier, 1874.
- CROVA. — C. R. 1897 sur l'enregistrement de l'intensité calorifique du soleil.
- DESSAINS et BRANLY. — C. R. 1869, 1874, 1875.
- MANSKY. — Historique de l'actinomètre. *Bulletin de la Société Astronomique de France*, janvier 1908.
- MICHELSON. — Instructions sur l'emploi de l'actinomètre à lame bimétallique. Moscou 1909.
- CROVA. — *Annales de chimie et physique*, 6^e série, t. XIV, 1888, p. 547.
- RADAU. — Actinomètre, G. Villars, Paris 1877, p. 20.
- L. GORCZYNSKI. — Enregistrement du rayonnement solaire au moyen du solarigraphe et du pyrhéliographe. *Eclaireur de Nice* 1934.
- C. ABBOT. — The Radiation of the sun.
— *The Journal of the Franklin Institute*, june 1914.
- Congrès de Montpellier de l'Association Française pour l'avancement des Sciences, 1879.
- K. ANGSTRÖM. — Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes. *Rapport présenté à la Société Royale des Sciences d'Upsala*, avril 1900.
- H. KIMBALL. — *Monthly Wether review*, vol. 27, n° 11, nov. 1919.
— *Id.*, n° 769.
- Scientific papers of the bureau of standards, Washington, n° 323.
- C. ABBOT et ALDRICH. — Smithsonian pyrhéliométry revised. *Smithsonian Misc. col.*, vol. 60, n° 1.918, 1913.

- A. ANGSTRÖM. — Note on the comparisons between pyrelimeters and the differences between the Angström standard and the Smithsonian standard. *Monthly weather review*, nov. 1918, p. 769.
- S. ARHENIUS. — Journal of the Franklin Institute, vol. 150, juill. 1920.
- J. ERICSON. — « Natura », 1880.
- L. GORCZYNSKI. — Sur les valeurs élevées des pertes de l'énergie de rayonnement solaire dans les plaines désertiques et les montagnes tropicales.
- S. LANGLAY. — Amount of the atmospheric absorption. Communication to the natural Society de Sc., avril 1884.
- *American Journal of Science*, vol. XXVIII, sept. 1884.
- Selective absorption of energy.
- *American Journal of Science*, vol. XXV, mai 1883.
- LORD RAYLEIGH. — On the transmission of light through atmos. containing small particles in suspension. *Phil. Magazine London*, 1889.
- L. KING. — On the scattering and absorption of light in gazeous media with application of the intensity of sky radiation. London, 1912.
- Ch. FABRY et H. BUISSON. — L'absorption de l'ultra violet par l'ozone. *Journal de physique*, 1^{re} série, t. 2, 196, Paris 1913.
- W. KASTROM. — Durchlassigkeit der absolut reinen und trikenen Atmosphäre für Sonnenstrahlung, Meteorol. Zeitschrift, p. 377-381. Braunschweig 1918.
- J. CABANNE et J. DUFAY. — Transparence de l'atmosphère dans le spectre visible diffusion moléculaire absorption par l'ozone. *Journal de physique*, t. 8, 6^e série, p. 125, Paris 1927.
- F. LINDHOLM. — Sur l'insolation dans la Suède septentrionale. *K. Sv. vetensk de atmosfære akad*, t. 50, n° 2, Stockholm.
- Ueber die stambrunbung de atmosfære, 1909 bis 1926.
- C. B. BRAZIER. — *Annales de l'Institut de Physique du globe*, t. IX, 1931.
- KIMBALL et MARVIN. — *Journal of the Franklin institute*, vol. 202.
- J. DEBRACH. — Instruction à l'emploi des actinomètres à lame bimétallique. Moscou, 1909.
- RAYMOND R. — Observations actinométriques. Montpellier, Imp. Centrale du Midi, 1918.
- BOUTARIC. — Bulletin de la classe des Sciences de l'Académie de Belgique n° 7, 1913. « Sur une relation entre l'absorption de lumière polarisée contenue dans la lumière polarisée par le ciel. Hayez, Bruxelles 1913.
- L. GORZYNSKI. — Enregistrement du rayonnement solaire au moyen du solarigraphe et du pyrhéliographe. *Eclaireur de Nice* 1934
- K. ANGSTRÖM. — Intensité de la radiation solaire à différentes altitudes. *Rapport présenté à la Société Royale de Sciences d'Upsala* le 7 avril 1900.
- C. R. T. CXLVI, 1908, p. 372.
- KIMBALL. — *Monthly weather review*, vol. 46, n° 499, nov. 1918.
- Scientific papers of the bureau of standards n° 323, Washington.

- ABBOT et ALDRICH. — Smithsonian pyrheliometry revised smithsonian Misc., vol. 60, n° 1918, année 1913.
- A. ANGSTRÖM. — Note on the comparaisons between pyrheliometers and the differences between the Angström standard and the Smithsonian standard Monthly weather review, nov. 1918, p. 769.
- Recording solar radiation, Stockholm 1928.
- A New instrument for mesuring sky radiation. *Monthly weather review*, novembre 1919.
- A. ANGSTRÖM et C. DORNO. — Registration of the intensite of the sun and different sky radiation. *Monthly weather review*, mars 1921.
- Ch. MAURAIN. — Recherches et inventions, 1^{er} juin 1926, 7^e année, n° 137, p. 286.
- Id. 15 juin 1927, 8^e année.
- GERDN. — Génie civil, 11 janvier 1940, t. CXVI, p. 387.
- PASTEUR. — Génie civil, juin 1942, n° 15, 62^e année, p. 169.
- CAUDOURIER. — Génie civil, 8 mars 1921.
- A. S. E. ACKERMAN. — The utilisising of solar energy. Journal of Royal Society of Arts, London, 15 avril 1915.
- Rapport du Congrès de l'eau, Alger 1928. Extrait du *Bulletin de la direction Générale de l'Agriculture, du Commerce et de la Colonisation*.
- GINESTOUS. — Direction Générale de T. Publics, service de météorologie. Imp. S. A. d'Imprimerie rapide, rue St-Charles, Tunis.
- J. RICHARD. — Recherches et inventions, déc. 1927, p. 475.
- C. GONDRON. — Génie Civil, t. CXVIII, n° 11, sept. 1941, p. 119.
- BARJOT. — C. R. Paris, t. 194, 1932, séance 7 mars 1932, p. 1484.
- N. CRISOLLET. — Etude de la lumière diffusée par les particules en suspension. C. R. T. 202, p. 1872, Paris 1936.
- A. ANGSTRÖM. — On the Atmospherique transmission of the Sun Geografiska annaler. T. XI, p. 156, 1922.
- Id. T. XII, p. 130, 1930.
- H. KIMBALL. — Turbidity of solar radiation. *Monthly Weather Review*, vol. 62, p. 330, 1934.
- H. WEXLER. — Turbidity of air. *Monthly Weather Review*, vol. 62, p. 397.
- Ch. MAURAIN. — La stratosphère et les couches plus élevées de l'atmosphère. *Revue Scientifique*, 26 septembre 1931.
- Annales du Service botanique tunisien, n° 3, 1925.
- L. GORCZYNSKI. — Annales du Service botanique tunisien, n° 3, 1935, p. 72.
- G. ABBOT et B. BOND. — Periodicity of Solar radiation. *Smith. Misc. Col. Vol.* 87, n° 9, 1932.
- F. VOLOCHINE. — Lithographie de l'O. N. M., 1934, p. 497.
- F. BAUR. — Zur frage der realist der schwankungen der Solarkonstant. *M. Z.*, vol. 49, p. 15, 1932.
- HOFFNER R. — 524 Lithographie de l'O. N. M., 1934.

- F. BAUR. — Die Abhängigkeit der Solarkonstant von solaren Erscheinungen, *Die Naturwissenschaften*, 20^e année, 521, 1932.
- P. AUGER. — R. 536 Lithographie de l'O. N. M., 1934.
- Schwankungen der Solarkonstant. *Zeitschrift für Astrophysik* (tirage à part du vol. IV, n° 3, p. 180, 1932.
- R. 537. lith. de l'O. N. M., 1934.
- C. ABBOT. — And other ann astrophys observat n° 3, 1919; n° 4, 1922.
- And other ann. valeurs of the solar constant. *Monthly Weather Review*, 51, 71 et 81, 1923.
- F. WHIPPERS. — « Does the Solar Heat Stream Vary ». London 1925.
- Ann. of the Astrophys observat. of the Smith instit., t. 2, 1913; t. 3, 1913.
- CROVA. — La radiation solaire. *Bulletin météorologique du département de l'Hérault*, 1889.
- Id. 1870 ; 1870.
- A. ANGSTRÖM et O. TRUSELIUS. — Total radiation from sun and *Sky at Abesko Géografiska*, annaler 1934, n° 1.
- BRAZIER. — C. R. T. 188, 11 mars 1929.
- Annales de physique du globe de France et d'outre-mer, n° 25, fév. 1938.
- A. ANGSTRÖM. — « On the Atmospheric transmission of Sun radiation *Geografiska* » annaler. T. XI, 2, p. 156, 1929.
- LINK. — Transmissionkoefficient und trübungs faktor beitr. *Z. phys. d. fr. atmos.* B. 10, 1922.
- A. ANGSTRÖM. — Recording Solar Radiation, Stockholm 1928.
- Bulletin actinométrique international, nov. 1919, mars 1918, nov. 1919, n° 5 1932, n° 6 1932, n° 7 1932, n° 8 1933, n° 9 1934, n° 10 1935, n° 11 1936, n° 12 1937, n° 8 bis 1933.
- F. BALL. — Position Tables London, 1907 et 1910.
- L. GORCZYNSKI. — Sur la marche annuelle de l'intensité du rayonnement solaire. Varsovie, 1906.
- Valeurs pyrhéliométriques et les sommes d'insolation à Varsovie. Varsovie 1914.
- A. ANGSTRÖM. — Meddelanden fran statens meteorologisk hydrografiska anstalt band, n° 30.
- WESTMAN. — Mesures de l'intensité du rayonnement solaire faites à Upsala en 1901. Upsala 1907. p. 35.
-

TABLE DES MATIERES

INTRODUCTION	7
<i>Chapitre I. — Le soleil</i>	9
<i>Chapitre II. — Mesure du rayonnement solaire</i>	13
1° Mesure de l'intensité du rayonnement solaire à un instant déterminé	13
2° Appareils enregistreurs	22
3° Appareils de mesure de la durée d'insolation	25
<i>Chapitre III. — Perte du rayonnement dans l'atmosphère</i>	29
1° Perte du rayonnement dans l'atmosphère	29
2° Constante solaire	31
<i>Chapitre IV. — Résultats des mesures de l'intensité du rayonnement solaire</i>	37
Variations diurnes	38
Variations annuelles de l'intensité	39
Variation avec la latitude	40
Variation avec l'altitude	41
Influence de la richesse de l'atmosphère en vapeur d'eau	42
<i>Chapitre V. — Utilisation de la chaleur solaire pour le chauffage domestique</i>	45
Appareil « Insol »	47
Nouvel appareil d'Abbot	48
Résultats obtenus	48
<i>Chapitre VI. — Application de la chaleur solaire à la distillation de l'eau et aux usages culinaires</i>	49
Utilisation de la chaleur solaire pour la distillation de l'eau ..	49
Utilisation de la chaleur solaire pour les usages culinaires	52
<i>Chapitre VII. — Application de la chaleur solaire pour la production ed force motrice</i>	55
<i>Chapitre VIII. — Projet d'installation de pompage par la chaleur solaire dans la steppe égyptienne</i>	63
<i>Chapitre IX. — Résumé et conclusion</i>	73
